Studien zum hygrischen Verhalten gealterter Leinwände

Inauguraldissertation

Zur Erlangung des Grades eines Doctor philosophiae

im Fachgebiet

Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut

an der Hochschule für Bildende Künste Dresden

vorgelegt von

Anna von Reden, geb. Bonewitz

geb. am 03.07.1979 in Göttingen

Betreuerin:

Prof. Dr. Ursula Haller, Hochschule für Bildende Künste Dresden

Gutachter:

1. Prof. Dr. Ursula Haller, Hochschule für Bildende Künste Dresden

2. Prof. Volker Schaible, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart

Tag der Verteidigung: 12.01.2018

Dank

Mein sehr herzlicher Dank gilt Frau Prof. Dr. Ursula Haller, Hochschule für Bildende Künste Dresden, für die Initiierung und Betreuung dieser Arbeit. Ihr Interesse an dem Thema äußerte sich in einem stets offenen Ohr, konstruktiver Kritik und motivierenden Gesprächen.
Prof. Volker Schaible, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, möchte ich sehr herzlich für die Bereitschaft danken, sich dieser Arbeit als Gutachter zu widmen.
Die Planung und Durchführung des experimentellen Teils wurde in erster Linie durch die vielfältige Unterstützung von Prof. Dr. Christoph Herm ermöglicht, dem ich an dieser Stelle besonders dankbar bin. Die Arbeit im Labor für Archäometrie der Hochschule für Bildende Künste Dresden wurde von der überaus freundlichen Hilfestellung von Annegret Fuhrmann und Dr. Sylvia Hoblyn begleitet.
Für die unkomplizierte Möglichkeit der Arbeit am VP-REM im Archäometrischen Labor der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, bin ich Prof. Dr. Christoph Krekel herzlich dankbar.
Dr. Andreas Lichtblau danke ich für die Bereitschaft der Kooperation hinsichtlich der Versuche zur Nullzugfestigkeit und der Anwendung der NIR-Spektroskopie. Die Möglichkeit der Nutzung der Geräte leistete einen wertvollen Beitrag für den experimentellen Teil dieser Arbeit. In diesem Sinne sei auch Herrn Jens Danneberg gedankt, dessen Mitwirken bei diesem Projekt wertvolle Hilfe geleistet hat. Theresa Bräunig sei gedankt für die Durchführung der Zugprüfungen am Garn und die Bereitstellung der Daten.
Ich danke Herrn Bernd Kretzschmar, Leiter des Technikums für Thermoplastverarbeitung des Leibnitz-Institut für Polymerforschung Dresden und Frau Maria auf der Landwehr für die Möglichkeit der Nutzung des Xenontests.
Für die Unterstützung bei der Erstellung der Sorptionsisothermen und Diskussion der Ergebnisse danke ich Frau Dr. Yvonne Schneider, Institut für Naturstofftechnik an der TU Dresden.
Für die Erstellung von Sorptionsisothermen im Zuge von Vorversuchen danke ich Herrn Rainer Alex und Herrn Xuan-Quang Vu, Reutlingen Research Institute der Hochschule Reutlingen.
Für die beratende Hilfestellung danke ich Frau Dr. Kathrin Pietsch am Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik. Ich danke ebenfalls Frau Dr. Hund und Frau Heidrich von der TU Dresden.
Die Durchführung der Nano-Computertomografie wurde freundlicherweise ermöglicht durch das Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS), Dresden. Herrn Jürgen Gluch und Dr. Andre Clausner sei hierfür gedankt.
Mein besonderer Dank geht an meine Eltern und meine liebe Familie für ihre bedingungslose Unterstützung. Danke lieber Tjark und liebe Pola.

Kurzfassung

Die vorliegende Dissertation hat die Untersuchung des hygrischen Verhaltens der Leinwand als Bildträger eines Leinwandgemäldes zum Gegenstand. Diese überaus komplexen Mechanismen sind in der Konservierungswissenschaft bis heute nicht verstanden.

In dem theoretischen Teil der Arbeit wird das komplexe Verhalten der Leinwand anhand ihres strukturellen Aufbaus erläutert. Die Darstellung der Erkenntnisse des aktuellen Forschungsstandes erfolgt bezüglich folgender struktureller Ebenen: Cellulose, Elementarfaser, technische Faser, Garn, Gewebe, Bildträger eines Leinwandgemäldes sowie deren Degradationsmechanismen. An den relevanten Stellen werden einflussgebende Faktoren benannt und analysiert. Gleichzeitig findet die Darstellung der Wissenslücken statt, woraus die für das Thema der Arbeit relevanten Forschungsfragen abgeleitet werden.

Der experimentelle Teil greift einen Teil der benannten Forschungsfragen auf und untersucht die Leinwand auf der Ebene der Cellulose in Bezug auf ihr hygrisches Verhalten. Dabei steht die Frage im Vordergrund, ob ein Zusammenhang zwischen der Alterung der Leinwand und der Menge der aufgenommenen Feuchte besteht und wie dieser erfasst werden kann.

In die Untersuchung werden neue, gebleichte und künstlich gealterte Flachsgewebe, sowie historische Bildträgerproben einbezogen. Für die Charakterisierung der Degradation werden folgende Merkmale erfasst: Gewebestrukturanalyse, pH-Wert, Kettenlänge der Cellulose, Kristallinität der Cellulose, Festigkeit am Gewebe und am Garn. Teilweise werden relevante Messverfahren zur Erfassung der genannten Merkmale entwickelt bzw. auf die besonderen Anforderungen historischer Bildträger angepasst. Die Menge der aufgenommenen Feuchte wird gravimetrisch erfasst und als Sorptionsisotherme dargestellt. Darüber hinaus erfolgt die Entwicklung einer Methode zur Erfassung der Gleichgewichtsfeuchte in situ am Gewebe oder Bildträger mittels Nah-Infrarot-Spektroskopie.

Abstract

This study focusses on the hygroscopic behaviour of canvases as a painting support. The complex behaviour of canvas is not yet fully understood in conservation science.

The theoretical chapter of this thesis describes the current state of research on the interaction between linen canvas and moisture. This is done by precisely distinguishing between the following structural hierarchies: cellular, fibrous, yarn, fabric, fabric support and its respective degradation mechanisms. Hereby the main gaps in knowledge and key questions relating to the behaviour of a canvas painting are being highlighted. Subsequently, the research question for this thesis are derived from this nescience.

The aim of the experimental part of this thesis is to examine the hygroscopic behaviour of linen canvas at the cellulose level. Leading question is whether there is a correlation between the condition of degraded canvases and its capacity to bind moisture and how this can be measured.

Studies are conducted with new, bleached and artificially aged linen canvases, as well as historical samples of painting supports. To classify the degradation of each canvas the following characteristics are determined: analysis of fabric structure, pH-value, chain length of cellulose, degree of crystallinity of cellulose and strength of fabric and yarn. Some of the measuring techniques have to be developed beforehand or adopted to the special requirements of historical samples of small size. The adsorption and desorption is analysed by registering sorption isotherms. In addition near-infraread spectroscopy is evaluated whether this analytical technique can be used for in-situ analysis of the moisture content of canvas.

Inhaltsverzeichnis

Dank ... 1

Kurzfassung ... 3

Abstract ... 5

Abkürzungsverzeichnis ... 11

Vorbemerkung ... 13

1 Einleitung ... 15
1.1 Einführung in das Thema ... 15
1.2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit ... 17

2 Forschungsstand ... 19
2.1 Celluloseforschung ... 19
2.2 Textiltechnische Forschung ... 20
2.3 Konservierungswissenschaftliche Forschung ... 22
2.3.1 Herstellung und Aufbau des textilen Bildträgers ... 22
2.3.2 Degradation des textilen Bildträgers ... 23
2.3.3 Verhalten des textilen Bildträgers und des Leinwandgemäldes ... 25

3 Von der Cellulose zum Leinwandgemälde: Einflussfaktoren auf das hygrische Verhalten der Leinwand ... 33
3.1 Grundlagen und Begriffsdefinitionen ... 34
3.1.1 Begriffsdefinitionen und grundlegender Aufbau der Leinwand ... 34
3.1.2 Begriffsdefinitionen und Grundlagen des hygrischen Verhaltens der Leinwand ... 37
3.2 Aufbau der Elementarfaser des Flachses ... 42
3.2.1 Cellulose ... 42
3.2.2 Begleitsubstanzen ... 56
3.2.3 Zusammenfassung ... 60
3.3 Flachsanbau und Gewinnung der technischen Faser ... 61
3.3.1 Flachsanbau ... 61
3.3.2 Gewinnung der technischen Faser ... 62
3.3.3 Zusammenfassung ... 69
3.4 Garn ... 70
3.4.1 Verspinnen der technischen Fasern zum Garn ... 70
3.4.2 Garngeometrie ... 73
3.4.3 Schlichte ... 75

3.4.4 Maximale Wasseraufnahme ... 76
3.4.5 Vergleich zu Baumwolle ... 77
3.4.6 Zusammenfassung ... 78
3.5 Gewebe ... 79
3.5.1 Weben ... 79
3.5.2 Veredlung der Gewebe ... 80
3.5.3 Sorption von Feuchte im Gewebe ... 85
3.5.4 Geschwindigkeit von Sorption und Desorption ... 86
3.5.5 Dimensionsänderungen des Gewebes ... 88
3.5.6 Feuchteeinfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Gewebes ... 92
3.5.7 Zusammenfassung ... 93
3.6 Leinwand ... 95
3.6.1 Gespannte Leinwand ... 95
3.6.2 Vorleimung ... 105
3.6.3 Grundierung ... 114
3.6.4 Malschicht ... 119
3.6.5 Gemälde als Materialverbund ... 122
3.6.6 Zusammenfassung ... 125
3.7 Degradation der Leinwand ... 127
3.7.1 Degradationsmechanismen ... 127
3.7.2 Auslösende Faktoren ... 130
3.7.3 Hygrisches Verhalten degradierter Leinwände ... 135
3.7.4 Zusammenfassung ... 146

4 Forschungsfragen und Zielstellung des experimentellen Teils ... 149
4.1 Analyse von Kapitel 3: Zusammenfassung einflussgebender Faktoren auf das hygrische Verhalten der Leinwand ... 149
4.2 Forschungsfragen ... 152
4.3 Ziele des experimentellen Teils ... 155

5 Analyse und Bewertung relevanter Messverfahren ... 157
5.1 Auswahl der Versuchsgewebe und deren Charakterisierung ... 157
5.1.1 Die Wahl der Versuchsgewebe ... 157
5.1.2 Künstliche Alterung neuer Gewebe ... 159
5.1.3 Bleichen neuer Gewebe ... 165
5.1.4 Charakterisierung der Gewebe durch die Gewebestrukturanalyse ... 165
5.2 Charakterisierung der Degradation am Gewebe ... 172
5.2.1 Messung des pH-Wertes ... 172
5.2.2 Bestimmung der Kettenlänge der Cellulose ... 175
5.2.3 Bestimmung der Kristallinität der Cellulose ... 178

5.2.4 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften ... 185
5.3 Bestimmung der Gleichgewichtsfeuchte ... 190
5.3.1 Sorptionsisothermen ... 190
5.3.2 Nah-Infrarot-Spektroskopie ... 195
5.4 Weiterführende Methoden ... 197
5.4.1 Variable Pressure-Rasterelektronenmikroskopie ... 198
5.4.2 Nano-Computertomographie ... 201

6 Durchführung der Experimente ... 203
6.1 Verwendete Gewebe ... 203
6.1.1 Neue Gewebe ... 203
6.1.2 Künstliche Alterung ... 205
6.1.3 Bleichen der Gewebe ... 207
6.1.4 Historische Gewebeproben ... 210
6.1.5 Benennung der verwendeten Gewebeproben ... 218
6.1.6 Gewebestrukturanalyse ... 218
6.2 Charakterisierung der Degradation der Gewebe ... 221
6.2.1 Bestimmung des pH-Wertes ... 221
6.2.2 Bestimmung der Kettenlänge der Cellulose ... 224
6.2.3 Bestimmung der Kristallinität der Cellulose ... 231
6.2.4 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften ... 235
6.3 Bestimmung der Gleichgewichtsfeuchte ... 241
6.3.1 Sorptionsisothermen ... 241
6.3.2 Bestimmung des Feuchtezuschlags mittels Nah-Infrarot-Spektroskopie ... 261
6.4 Analyse der Ergebnisse ... 270
6.4.1 Bewertung der Degradation der verwendeten Gewebe ... 270
6.4.2 Korrelation der gemessenen Parameter der Degradation ... 274
6.4.3 Zusammenhang zwischen Degradation und hygrischem Verhalten ... 275

7 Zusammenfassung ... 279
7.1 Erkenntnisse aus dem theoretischen Teil der Arbeit ... 279
7.2 Erkenntnisse aus dem experimentellen Teil der Arbeit ... 285
7.2.1 Bewertung einzelner Messverfahren ... 285
7.2.2 Erkenntnisse aus den durchgeführten Experimenten ... 287

8 Schlussbemerkung ... 291

Anhang ... 293

A Tabellen ... 294
A.1 Definitionen ... 299

B Anlagen zum experimentellen Teil 300
B.1 Charakterisierung der verwendeten Gewebe 300
B.1.1 Neues Flachsgewebe N1, Herstellerangaben 300
B.1.2 Künstliche Alterung 301
B.2 Gewebestrukturanalysen und Informationen der verwendeten Gewebe und historischen Proben 304
B.3 Ergebnisse pH-Wert Messung 341
B.4 Kapillarviskosimetrie 342
B.4.1 Verwendete Geräte 342
B.4.2 Protokoll zur Erfassung des Feuchtezuschlags der Garnproben 342
B.4.3 Messprotokolle Viskosität 344
B.5 Infrarot-Spektroskopie 351
B.5.1 Ergebnisse 351
B.6 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften 356
B.6.1 Streifen-Zugversuch an Geweben 356
B.6.2 Nullzugfestigkeit an Garnabschnitten 357
B.7 Bestimmung der Gleichgewichtsfeuchte durch Sorptionsisothermen 365
B.7.1 Statische Methode 365
B.7.2 Dynamische Methode 380
B.8 Bestimmung der Gleichgewichtsfeuchte mittels NIR-Spektroskopie 387

Literaturverzeichnis 400

Abbildungsverzeichnis 433

Tabellenverzeichnis 439

Abkürzungsverzeichnis

ATR	Attenuated total reflection, dt. abgeschwächte Totalreflexion
BET	Brunauer, Emmet, Teller
C. I.	Kristallinitätsindex
DP	Durchschnittlicher Polymerisationsgrad
DVS	Dynamic vapour sorption
$EWNN_{mod(NaCl)}$	Eisen(III)-Weinsäure-Natriumkomplex gelöst in Natronlauge
FT-IR	Fourier-Transform-Infrarot
GAB	Guggenheimer, Anderson, De Boer
GVZ	Grenzviskositätszahl
HfBK	Hochschule für Bildende Künste
IR	Infrarot
MW	Mittelwert
NIR	Nah-Infrarot
rF	Relative Feuchte
RMSEP	root mean squared error of prediction
STABW	Standardabweichung
TAPPI	Technical Association of the Pulp and Paper Industry
UV	Ultraviolett
VP-REM	Variable Pressure Rasterelektronenmikroskop

Vorbemerkung

Die vorliegende Arbeit wurde gefördert durch den Europäischen Sozialfonds unter der Antragsnummer 100108215.

Teile dieser Arbeit wurden bereits in folgenden Veröffentlichungen publiziert:

Anna von Reden, *Uncertainties in the interaction between a canvas painting support and moisture*, in: Climate for collections. Standards and uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference, 7—9 November 2012. Jonathan Ashley-Smith, Andreas Burmester, Melanie Eibl (Hrsg.), Archetype Publications, London 2013, S. 247—256.

Anna von Reden, Dirk Andreas Lichtblau, Jens Danneberg, Ursula Haller, *A technical note on the determination of moisture regain of canvas painting supports using near-infraread spectroscopy (NIRS)*, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 29 (1) 2015, S. 141—148.

Theresa Bräunig, Anna von Reden, Dirk Lichtblau, Christoph Herm, *Eine neue Technik zur Bestimmung der Festigkeit von textilen Bildträgern und ihr Zusammenhang mit dem Polymerisationsgrad der Celluose*, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 30 (2) 2016, S. 351—362.

1 Einleitung

1.1 Einführung in das Thema

Leinwandgemälde bestehen zu einem Großteil aus hygroskopischen Materialien: dem Gewebe als Bildträger und den darauf befindlichen unterschiedlichen Leim-, Grundierungs- und Malschichten. Diese Materialien treten mehr oder weniger ausgeprägt mit Feuchte in Wechselwirkung, was sich in Dimensions- und Eigenschaftsänderungen äußern kann. Die Bewegungen aufgrund dieser Dimensionsänderungen des Leinwandgemäldes wurden eindrucksvoll von SCHAIBLE in seinem Film „*Vom Atmen der Bilder*" im Zeitraffer visualisiert.[1]

Ursächlich für die Wechselwirkung von Feuchte mit dem Leinwandgemälde sind einerseits wechselnde Umgebungsfeuchten, was jedes Leinwandgemälde mehr oder weniger ausgeprägt betrifft, andererseits kann die Feuchte aber auch gezielt im Rahmen von Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen zum Einsatz kommen. Dies betrifft sowohl Wasserdampf als auch Wasser in flüssiger Form. In diesem Zusammenhang kann die Feuchte auf allen Ebenen des Leinwandgemäldes zum Einsatz kommen: das lokale Einbringen wässriger Klebemittel zur Befestigung gelockerter Mal- und Grundierungsschichten, die lokale oder ganzflächige Befeuchtung der Leinwand zur Beseitigung von Deformationen, die Doublierung mit wasserlöslichen Klebemassen (oder heute vielleicht eher die Entfernung derselben wiederum mit wässrigen Medien) bis hin zur Oberflächenreinigung mit Wasser oder wässrigen Reinigungslösungen. ACKROYDS Studie zu praktizierten Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen am Leinwandgemälde zeigte, dass die Verwendung von Feuchte zur Beseitigung von Deformationen im Bildträger seit den 1980er Jahren deutlich zugenommen hat. Dabei zeigte sich, dass die meisten Restauratoren die Dosierung der Feuchte empirisch ermitteln, weil es kaum objektive Kriterien gibt, die man für die Beurteilung der Reaktionen des Gemäldes heranziehen kann.[2] Obwohl sich Restauratoren auf eine Fülle von empirischen Erfahrungen stützen können, deren Wert nicht unterschätzt werden soll, ist ein wirklich zielgerichteter Einsatz von Feuchte bis heute nicht möglich.

Problematisch erscheint diese Tatsache vor dem Hintergrund, dass Feuchte ein ernst zu nehmendes Schädigungspotential am Leinwandgemälde besitzt. Zum einen beschleunigt es die Alterung der Leinwand und zum anderen können unerwartete Bewegungen im Gemälde zu Deformationen, Rissen oder Schichtentrennungen führen. Um dieses Schädigungspotential zu

1 SCHAIBLE 1989.
2 ACKROYD 2002.

verringern, haben Restauratoren zeitweise sogar versucht, das Leinwandgemälde vor der schädigenden Wirkung von Feuchte durch imprägnierende Wachsdoublierungen zu schützen.[3]
In diesem Zusammenhang scheint die von Schaible formulierte Frage berechtigt: Ist die Feuchtigkeit der Todfeind unserer Kunstwerke?[4]
Tatsächlich ist es so, dass Feuchte am Leinwandgemälde sehr unterschiedliche, ja gegensätzliche Reaktionen hervorbringen kann. Nur dadurch ist zu erklären, dass eine Befeuchtung der Leinwand sowohl dem Schrumpfen überdehnter Partien, als auch dem Dehnen geschrumpfter Bereiche dienen kann. Nur fehlen zufrieden stellende Erklärungen für das genannte Phänomen. Bisherige Forschungsergebnisse haben vor allem eines gezeigt: dass das Verhalten des Leinwandgemäldes komplex und bis heute nicht vorhersehbar ist. Die Einschätzung von Heiber zum Kenntnisstand des Verhaltens der Leinwand aus dem Jahr 2006, hat auch heute noch Gültigkeit: "In gewisser Weise befinden wir uns noch in einem Zustand zwischen Zusammentragen, Sichten und Ordnen. Wie sich die Kräfte im einzelnen gegenseitig bedingen, das lässt sich gerade mal erahnen. […] In vielen Fällen wissen wir nicht einmal wo wir ansetzen sollten."[5]
Es ist also dringend notwendig, das Wissen um das hygrische Verhalten des Leinwandgemäldes zu vertiefen. Die Feuchte soll möglichst gezielt eingesetzt werden können, um unnötige Feuchte und daraus resultierende Schäden zu vermeiden.

Die Notwendigkeit, mehr Kenntnisse über das Verhalten des Leinwandgemäldes zu erlangen, spiegelt sich auch in der aktuellen Debatte über Klimawerte für die Aufbewahrung von Kunst- und Kulturgut wider.[6] Bis heute können keine konkreten Verhaltensweisen von Leinwandgemälden vorhergesagt werden, was eine denkbar ungünstige Ausgangssituation für Entscheidungsträger ist, die über Umgebungsbedingungen zur Lagerung und Ausstellung von Kunstgegenständen debatieren.

Es drängt sich der Verdacht auf, dass nicht die Feuchte selbst der Feind ist, sondern eher die Unwissenheit, die dieses Feld ummantelt.

3 Ackroyd 2005.
4 Schaible 1987, S. 76.
5 Heiber 2006, S. 48.
6 Atkinson 2014.

1.2 Zielstellung und Aufbau der Arbeit

Diese Dissertation soll einen Beitrag zu der Frage leisten, wie die Leinwand als Bildträger eines Gemäldes auf Feuchte reagiert, um deren Wirkung besser einschätzen und die Reaktionen der Leinwand besser vorhersagen zu können. Ein besonderer Fokus wird auf die Frage gelegt, wie sich die Leinwand im Laufe ihrer Alterung verändert und inwieweit sich diese Veränderungen auf das hygrische Verhalten auswirken. Dabei wird sich die Betrachtung auf Leinwände aus dem Faserrohstoff Flachs konzentrieren.

Die Arbeit untergliedert sich in einen theoretischen Teil (Kapitel 2 bis 4) und einen experimentellen Teil (Kapitel 5 und 6).

Aufgrund der Komplexität des Verhaltens des Leinwandgemäldes, dienen Kapitel 2 und 3 dazu, den Forschungs- und Kenntnisstand zu diesem Verhalten zusammen zu tragen und darzustellen. Kapitel 2 gibt einen Forschungsüberblick zu solchen Themengebieten, die für das Verständnis des hygrischen Verhaltens der Leinwand relevant sind. Der Forschungsüberblick ist nach Themengebieten geordnet. Neben der Forschung aus konservierungswissenschaftlicher Sicht, sind die Forschung zum Aufbau, Alterung und Verhalten der Cellulose, sowie zum Aufbau, Verarbeitung und Verhalten der Fasern, Garne und Gewebe aus textiltechnischer Sicht relevant.
Mit Kapitel 3 wird erstmalig eine umfassende Zusammenstellung jenes Wissens vorgenommen, wie die Leinwand auf Feuchte reagiert. Bisher ist es der Forschung nicht gelungen, die einzelnen Einflussparameter zu definieren und voneinander zu differenzieren. Die Darstellung dieser Zusammenhänge erfolgt anhand des Aufbaus, der Herstellung und der Alterung der Leinwand. Weil natürlich auch die auf der Leinwand befindlichen Schichten in Form von Vorleimung, Grundierung und Malschicht dieses Verhalten maßgeblich beeinflussen, wird auch das Verhalten des Leinwandgemäldes beschrieben, ohne dafür jedoch Erkenntnisse aus anderen Disziplinen zu berücksichtigen.
Zur Beschreibung des hygrischen Verhaltens der Leinwand fließen Kenntnisse verschiedener Disziplinen ein, die entweder in der Konservierungswissenschaft schon bekannt sind, als auch neu dafür zusammengestellt werden. Dafür sind Kenntnisse aus der Cellulosechemie, Papier-, Holz- und Textiltechnik relevant. Gleichzeitig werden an den jeweiligen Stellen die Desiderate aufgezeigt.
Kapitel 4 beinhaltet eine Analyse der in Kapitel 3 dargestellten Einflussfaktoren auf das hygrische Verhalten der Leinwand und der aus Kapitel 3 hervorgehenden Forschungsfragen und Desiderate im bisherigen Wissen um das hygrische Verhalten der Leinwand. Kapitel 4 wird durch eine Darstellung abgeschlossen, welche Fragen aufgegriffen und im experimentellen Teil bearbeitet werden.

Es folgt der zweite, auf Methoden und durchzuführende Experimente ausgerichteter Teil, welcher Kapitel 5 und 6 umfasst.

In Kapitel 5 werden die für die zu bearbeitenden Fragen relevanten Methoden diskutiert und ihre Auswahl begründet. Da es für mehrere Fragestellungen dieser Arbeit keine standardisierten Vorgehen gibt, mussten die Vorgehensweisen bzw. Messmethoden im Rahmen der vorliegenden Arbeit teilweise erst entwickelt werden, was in diesem Kapitel ebenfalls dargestellt wird.
Kapitel 6 umfasst den experimentellen Teil, der die Durchführung und die Ergebnisse der Experimente beschreibt. Abschließend werden in der Analyse der Ergebnisse die Resultate aufeinander bezogen und interpretiert.

Die Arbeit schließt mit der Zusammenfassung in Kapitel 7 und dem Ausblick, der als Kapitel 8 die noch bleibenden und neue aufgekommenen Fragestellungen benennt.

2 Forschungsstand

Das hygrische Verhalten der Leinwand wird von einer Vielzahl von Einflussfaktoren bestimmt. Insbesondere sind es sein komplexer Aufbau und die durch die Alterung auftretende Veränderung im Material. Die spezifischen Erkenntnisse zu diesem Themenfeld in der Konservierungswissenschaft bauen auf vielen Erkenntnissen anderer Disziplinen auf, wie der Cellulosechemie und der Textiltechnik. Daher werden diese Disziplinen im Folgenden mit in den Forschungsstand aufgenommen.

2.1 Celluloseforschung

Die Forschung zum Aufbau der Cellulose reicht ins 19. Jh. zurück. 1838 wurde erstmal eine Summenformel ermittelt und kurz darauf der Begriff „Cellulose" eingeführt. Mit der ebenfalls im 19. Jh. einsetzenden Entwicklung neuer Werkstoffe durch chemische Veränderungen der Cellulose, entstanden umfassende Erkenntnisse zum Aufbau und zum Reaktionsvermögen der Cellulose. Ein Teil dieser frühen Forschungserkenntnisse besitzen heute immer noch Gültigkeit. Einen kurzen Überblick zum Forschungsverlauf der Cellulose geben Klemm et al. in ihrem Artikel „*Cellulose: faszinierendes Biopolymer und nachhaltiger Rohstoff*".[7]
Bis heute sind verschiedene Übersichtsarbeiten zur Cellulose erschienen. Darunter stellen die Monografie von Krässig „*Cellulose: structure, accessibility, and reactivity*" [8] und das zweibändige Werk von Klemm et al. mit dem Titel „*Comprehensive Cellulose Chemistry*" [9] fundierte und umfangreiche Standardwerke dar, deren Verfasser als renommierte Forscher auf ihrem Gebiet gelten. Eine aktuellere Zusammenstellung über Gewinnung, Aufbau und Verarbeitung von Cellulose unterschiedlicher Pflanzen bietet Wüstenberg mit ihrem Buch „*Cellulose and cellulose derivatives in the food industry*" [10] jedoch bezieht die Verfasserin die Erkenntnisse stark auf die Lebensmitteltechnologie.
Bis heute sind bestimmte Aspekte bezüglich der Struktur der Cellulose ein kontrovers diskutiertes Thema, welches vor allem am Fraunhofer-Institut für Angewandte Polymerforschung (IAP) in Potsdam untersucht wird.
Die Mehrzahl der Forschungstätigkeit beruht auf Cellulose aus Holz und Baumwolle. Die jeweilige Übertragbarkeit auf Flachs muss im Einzelfall hinterfragt werden.

7 Klemm et al. 2005.
8 Krässig 1993.
9 Klemm et al. 1998.
10 Wüstenberg 2015.

2.2 Textiltechnische Forschung

Die Forschung zu Flachsfasern ist eng mit der Geschichte des Flachsanbaus verbunden. Flachs stellte bis ins 19. Jh. einen wesentlichen Ausgangsstoff für die europäische Textilherstellung dar. Im Laufe des 19. Jhs. wurde sein Anbau und seine Verarbeitung durch den vermehrten Import von Baumwolle zurückgedrängt. Im Verlauf der beiden Weltkriege dehnte sich die Flachsproduktion erneut aus, weil eingeschränkte Handelsbeziehungen die Eigenproduktion in Europa notwendig machte. Nach dem 2. Weltkrieg ging der Flachsanbau deutlich zurück und kam in Deutschland gänzlich zum Erliegen. Erst durch gezielte Förderungsmaßnahmen wurde der Flachsanbau in den 1970er Jahren wieder aufgenommen. Im Zuge dieser Entwicklung entstand in den 1980er Jahren von Dambroth/Seehuber eine kleinen Monografie *„Flachs: Züchtung, Anbau, Verarbeitung"* [11], in der auch die historische Entwicklung des Flachsanbaus in knapper Form zusammengestellt wurde.
Forschungsvorhaben in Bezug auf Flachs nach dieser Zeit, beziehen sich meist auf seine Anwendung in faserverstärkten Kunststoffen. Im Wesentlichen betrifft dies Festigkeitseigenschaften und neue Aufschlussverfahren für die Kurzfaserproduktion.

Aufgrund dieser historischen Entwicklung stammt die Grundlagenforschung zu Flachsfasern im Wesentlichen aus der Zeit vor dem 2. Weltkrieg. In dieser Zeit entstanden mehrere Standardwerke zum Aufbau der Fasern, deren Anbau und Verarbeitung. Stellvertretend kann die Monografie „*Der Flachs*" [12] von Kind et al. genannt werden. Vergleichbare Abhandlungen über Flachs sind nach dem 2. Weltkrieg nicht mehr veröffentlicht worden. Die nach dem 2. Weltkrieg publizierten Werke zu Textilfasern umfassen eine größere Vielfalt an Faserrohstoffen. Stellvertretend können Wolfgang Bobehts „*Textile Faserstoffe*" und Robert Francks „*Bast and other plant fibres*" genannt werden.[13] Beide beinhalten zwar grundlegende Daten zu Flachs, jedoch nimmt er darin eine untergeordnete Stellung ein. Der Großteil dieser Daten zu Eigenschaften der Flachsfasern stammt aus der Zeit vor dem 2. Weltkrieg. Dies zeigt, dass es in jüngerer Zeit keine Grundlagenforschung zu Flachs gegeben hat. Eine umfangreiche Datensammlung zu Kennwerten von Flachs jeglicher Art bietet der von Koch 1955 herausgegebene Band „*Faserstoffe*" [14], der Teil der mehrbändigen Reihe „*Landolt-Börnstein-Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie und Astronomie, Geophysik und Technik*" ist.
Die relativ aufwendige Gewinnung und Aufbereitung der Fasern zum Verspinnen haben sich im Laufe der Geschichte verändert. Ein Überblick zu diesen Veränderungen mit ihren Auswirkungen auf die Materialeigenschaften liegt bisher nicht vor. Kenntnisse über Gewinnung und Aufbereitung der Fasern können den Quellenschriften der jeweiligen Zeit entnommen werden. Hier können für das 18. Jh. Marpergers „*Ausführliche Beschreibung des Hanff und Flachs und der*

11 Dambroth/Seehuber 1988, S. 9—14.
12 Kind et al. 1930.
13 Bobeth 1993, Franck 2005.
14 Koch 1955.

daraus verfertigten Manufacturen, sonderlich des Zwirns, der Leinwand und Spitzen, was in solchen vor ein grosser handel durch alle Welts-Theile getrieben und wie viel tausend Personen dadurch ernehret werden“ [15] und Halles „*Werkstätte der heutigen Künste, oder die neue Kunsthistorie: Erster Band*“ [16] genannt werden. Ein vielzitiertes Werk des 19. Jhs. stellt Grothes Pubikation „*Katechismus der Spinnerei, Weberei und Appretur oder Lehre von der mechanischen Verarbeitung der Gespinnstfasern*“ [17] dar. Für die Zeit nach dem 2. Weltkrieg haben Dambroth/Seehuber[18] sowie Schroth innerhalb seiner Dissertation „*Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Flachsröste*“ [19] die aktuellen Methoden zusammengetragen.

Über die Herstellung von Garn und Gewebe sind zahlreiche Standardwerke in ihrer jeweiligen Zeit publiziert worden. Einen Überblick über die historische Entwicklung der Techniken wurde von Bohnsack unter dem Titel „*Spinnen und Weben: Entwicklung von Technik und Arbeit im Textilgewerbe*“ [20] erarbeitet. Nicht behandelt werden darin die mechanische oder chemische Veredlung von Garnen und Geweben. Die historische Entwicklung dieser Arbeitsschritte wurde teilweise von Mecheels et al. in der „*Kultur- und Industriegeschichte der Textilien*“ [21] erarbeitet. Da es sich um ein relativ umfangreiches Themengebiet handelt, sind dort auch nicht alle Aspekte behandelt. Andere Beschreibungen über Verfahrenstechniken besitzen jedoch nur für die jeweilige Zeit Gültigkeit. Bezogen auf das 20. Jh. sind mehrere Werke diesbezüglich entstanden. Stellvertretend können Bernard mit „*Appretur der Textilien*“ [22] und Stöckigt mit „*Appretur: Vorappretur, Bleichen, Trocknen, mechanische und chemische Appretur*“ [23] genannt werden. In Bezug auf das Bleichen erarbeitete Kind ein umfangreiches Werk mit dem Titel „*Das Bleichen der Pflanzenfasern*“.[24]

Die ersten publizierten Messungen zur Feuchteaufnahme von Flachsfasern wurden durchgeführt, um für den Verkaufspreis das exakte Gewicht der Fasern, Garne und Gewebe bestimmen zu können. Eine sehr frühe systematische Messung der Feuchte von Flachs wurde 1875 von Persoz durchgeführt und von Hönig in seiner Dissertation „*Beiträge zur Kenntnis der hygroskopischen Eigenschaften der Textilfasern unter Berücksichtigung der Entwicklung der Trocknungsapparate, -verfahren und -anstalten“* [25] 1918 abgedruckt. Ebenfalls bereits im 19. Jh. wurde die Feuchteaufnahme von Flachs von Müller gemessen, die er in seinem Artikel „*Über den Wassergehalt der Faserstoffe in seiner Abhängigkeit von dem Feuchtigkeitsgehalte der Atmosphäre*“ publizierte.[26] Weitere Untersuchungen zur Gleichgewichtsfeuchte von Flachs folgten, in voneinander unabhängigen

15 Marperger 1710.
16 Halle 1761.
17 Grothe 1861.
18 Dambroth/Seehuber 1988.
19 Schroth 1995.
20 Bohnsack 1981.
21 Mecheels et al. 2009.
22 Bernard 1967.
23 Stöckigt 1990.
24 Kind 1932.
25 Hönig 1918, S. 78.
26 Müller 1882.

Studien, in der ersten Hälfte des 20. Jhs. Die 1928 von SCHAPOSCHNIKOFF in dem Artikel „*Über die Feuchtigkeit der Textilrohstoffe*“ [27] dargestellten Messungen hatten zum Ziel, einen Jahresdurchschnitt bezüglich der Menge an gebundener Feuchte zu ermitteln. Die Gründe für die unterschiedliche Gleichgewichtsfeuchte von Flachs wurden erstmals von SCHILLING untersucht, der sie in Bezug zu der Zusammensetzung der Flachsfasern setzte. Seine Ergebnisse sind in dem 1930 erschienenen Artikel „*Worauf beruht der verschiedene Feuchtigkeitsgehalt der Flachsgarne*“ [28] zusammengefasst. Weitere Messungen wurden von BOBETH 1941 in seinem umfangreichen Artikel „*Die wahre Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener Faserstoffe und deren Mischungen bei Normbedingungen als Grundlage für die Berechnung von quantitativ-chemischen Mischgespinstanalysen*“ [29] veröffentlicht. Darüber hinaus führte er erstmals eine Systematik in der Begrifflichkeit in Bezug auf die Feuchte in Faserstoffen ein. Eine detailliertere Sicht auf den Einfluss unterschiedlich gesponnener, sowie gebleichter Garne, veröffentlichte SCHEITHAUER in seinem Beitrag „*Über die Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe der Leinengarne*“.[30] Die genannten Untersuchungen aus der 1. Hälfte des 20. Jhs. besitzen bis heute Gültigkeit und werden auch noch in neuerer Literatur zitiert.[31]
Eine in dieser Form bis heute einzigartige Monografie über die Wechselwirkungen zwischen Feuchte und Faserstoffen in Textilien, wurde 1960 mit Beiträgen verschiedener Autoren von HEARLE/PETERS unter dem Titel „*Moisture in textiles*“[32] publiziert. Darin wurden die Wechselwirkungen zwischen Faserstoffen und Feuchte fundiert in Bezug auf den molekularen Aufbau der Faserstoffe dargestellt.

2.3 Konservierungswissenschaftliche Forschung

2.3.1 Herstellung und Aufbau des textilen Bildträgers

Das von KOLLER 1984 verfasste, erste Standardwerk seiner Art zum „*Staffeleibild der Neuzeit*“ [33] fasst den damaligen Kenntnisstand zur Technologie des textilen Bildträgers so zusammen, dass „grundlegende historische Übersichten zu Produktion, Handel und Verwendung von textilen

27 SCHAPOSCHNIKOFF 1928.
28 SCHILLING 1930b.
29 BOBETH 1941.
30 SCHEITHAUER 1941.
31 So z. B. HAUDEK/VITI 1981 und BOBETH 1993.
32 HEARLE/PETERS 1960.
33 KOLLER 1984.

Bildträgern ebenso wie exakte Faserbestimmungen von statistisch auswertbarem Umfang" fehlen.[34] Dies hat sich bis heute nur wenig geändert.
Bestimmungen der Faserart textiler Bildträger werden vereinzelt in anderen Zusammenhängen erwähnt, überblicksartige Zusammenstellungen sind beispielsweise von VANDERLIP DE CARBONNEL, WUFKA und SCHEEL erarbeitet worden.[35]
Die Kenntnis über die geometrischen Merkmale der als Bildträger verwendeten Gewebe sind noch geringer. Erst 1992 wurde dieses Thema von ROUBA durch ihren Beitrag „*Die Leinwandstrukturanalyse und ihre Anwendung für die Gemäldekonservierung*" [36] in die Konservierungswissenschaft eingeführt. Beabsichtigt war damit, bestimmte Merkmale standardisiert zu erfassen, um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Zeitgleich erschien durch SCHEEL mit ihrem Beitrag „*Der textile Bildträger*" [37] eine erste Sammlung solcher Daten, die jedoch teilweise nach anderen Kriterien erfasst wurden. Durch die weitere Beschäftigung mit der Dokumentation einzelner Merkmale des Bildträgers durch LIPINSKI[38] innerhalb einer unpublizierten Studienarbeit, beginnt es sich heute vermehrt zu etablieren, geometrische Merkmale des Gewebes zu dokumentieren. Um auch solche Bildträger untersuchen zu können, die nicht mehr von der Rückseite her einsehbar sind, wurde von JOHNSON ein auf der Analyse von Röntgenaufnahmen basierendes Prinzip der Gewebedokumentation entwickelt. Motivation für diese Methodik war es, Leinwände zuordnen zu können, die ursprünglich aus einer Gewebebahn stammten.[39] All diese Entwicklungen hatten die Beschreibung und Dokumentation der Bildträger zum Ziel. Eine umfassende Empfehlung zur Erfassung geometrischer Merkmale textiler Bildträger bleibt jedoch ein Desiderat. Ebenso wie der Rückschluss von diesen Merkmalen auf das Verhalten der Bildträger.

2.3.2 Degradation des textilen Bildträgers

Die Forschung zur Degradation des textilen Bildträgers ist verknüpft mit der Forschung an Cellulose. Schon 1969 wurden die Erkenntnisse der Cellulosechemie für die Konservierungswissenschaft in Bezug auf Papier durch PADFIELD aufbereitet.[40] Bei den in der Celluloseforschung untersuchten Materialien handelte es sich in der Regel um Papier und nicht um textile Faserstoffe. Das spiegelt sich auch im konservierungswissenschaftlichen Forschungsstand wieder, wo zu Papier ein erheblich größerer Anteil an Publikationen und Forschungstätigkeit in Bezug auf die Degradation zu verzeichnen ist.

34 KOLLER 1984, S. 290.
35 VANDERLIP DE CARBONNEL 1980; SCHEEL 1992; WUFKA 2004.
36 ROUBA 1992.
37 SCHEEL 1992.
38 LIPINSKI 2006.
39 JOHNSON et al. 2011.
40 PADFIELD 1969.

Mit konkretem Bezug auf den textilen Bildträger führten HACKNEY/HEDLEY Experimente zur Alterung durch, deren Ergebnisse sie in ihren Artikeln „*Measurements of the ageing of linen canvas*“[41] und „*Linen canvas artificially aged*“ [42] darstellten. Grundlegende chemische Mechanismen, die mit der Alterung einhergehen, wurden in Bezug auf Textilfasern von KRONKRIGHT in seinem Buch „*Deterioration of artifacts made from plant materials*“ [43] und von TIMÁR-BALÁSZY/EASTOP in dem Standardwerk „*Chemical principles of textile conservation*“ [44] vorgestellt.

Eine prägnante Zusammenfassung der verschiedenen Mechanismen und Einflussfaktoren in Bezug auf den textilen Bildträger wurde von ZUMBÜHL/SCHERRER in ihrem Artikel „*Aktive Passivierung der Degradation cellulotischer Strukturgefüge. Untersuchungen zur "Entsäuerung" textiler Gemäldebildträger*“ [45] gegeben.

Das von BANIK und BRÜCKLE 2015 publizierten Standardwerk „*Papier und Wasser: Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher*“[46] beinhaltet eine aktuelle Zusammenstellung von WHITMORE zur Alterung von Cellulose in Papier mit speziellem Fokus auf die Rolle von Feuchte.[47]

Die objektive Erfassung des Degradationsgrades gealterter textiler Bildträger ist bis heute ein dringendes Desiderat. Eine umfassende Beschäftigung mit der Charakterisierung textiler Bildträger wurde von DREXLER in ihrer Diplomarbeit „*PH-Metrie und Mikro-Kapillarviskosimetrie als Möglichkeit zur chemisch-physikalischen Charakterisierung textiler Bildträger*“ [48] vorgenommen. Eine weiterführende Entwicklung stellt die Forschungstätigkeit von ORIOLA et al. dar, die den Zustand der Leinwand mittels Nahinfrarot-Spektroskopie zerstörungsfrei erfassen wollen.[49]

Eine Zusammenstellung von methodischen Ansätzen zur Erfassung des Degradationsgrades von Textilien wurde von ROTHAMEL in ihrer Publikation „*Alterungsprozesse von Textilfasern: eine Standortbestimmung*“ [50] 2000 vorgenommen. WYETH stellte in seinem Artikel „*Signatures of ageing: correlations with behaviour*“ [51] ebenfalls solche methodischen Ansätze zusammen, geht dabei jedoch konkreter auf ihre Anwendbarkeit an originalen Proben ein. Für Papier wurde der Stand der Forschung zur Charakterisierung der Degradation von ZERVOS/MOROPOULOU zusammengetragen.[52] Eine etwas aktuellere Sicht auf die Prüfung von Papier bieten HENNIGES/POTTHAST mit ihrem Beitrag „*Charakterisierung von Papier*“ [53] im bereits zuvor erwähnten Standardwerk „*Papier*

41 HACKNEY/HEDLEY 1981.
42 HACKNEY/HEDLEY 1984.
43 KRONKRIGHT 1990.
44 TÍMÁR-BALÁZSY/EASTOP 1998.
45 ZUMBÜHL/SCHERRER 2003.
46 BANIK/BRÜCKLE 2015.
47 WHITMORE 2015.
48 DREXLER 1999.
49 ORIOLA et al. 2011, ORIOLA et al. 2014.
50 ROTHAMEL 2000.
51 WYETH 2005.
52 ZERVOS/MOROPOULOU 2006.
53 HENNIGES/POTTHAST 2015.

und Wasser“ [54]. Eine auf den textilen Bildträger angepasste Zusammenstellung liegt bisher nicht vor.
In den genannten Publikationen werden in der Regel die Bestimmung des durchschnittlichen Polymerisationsgrades (DP), des pH-Wertes und die Bestimmungen von Festigkeitseigenschaften genannt. Für keine dieser Methoden ist bisher ein standardisiertes Verfahren etabliert, um es am originalen textilen Bildträger anwenden zu können. Darüber hinaus existieren für Flachsgewebe keine publizierte Daten, die einen Bezug zwischen pH-Wert, DP der Cellulose und der Festigkeit herstellen.[55]

2.3.3 Verhalten des textilen Bildträgers und des Leinwandgemäldes

Das hygrische Verhalten von Leinwandgemälden ist eng mit seinen mechanischen Eigenschaften bzw. dem mechanischen Verhalten verbunden und davon nicht immer eindeutig zu trennen. Daher finden diese Untersuchungen für die Darstellung des Forschungsstandes bezüglich des hygrischen Verhaltens ebenfalls Berücksichtigung.

Schon in den beiden sehr früh veröffentlichten Werken über die Technologie der Gemälde „*Handbuch der Gemäldekunde*“ (1904)[56] von Von Frimmel und Eibners „*Entwicklung und Werkstoffe der Tafelmalerei*“ (1928)[57] wurde das hygrische Verhalten des Leinwandgemäldes thematisiert. Beide Autoren beschrieben das Quellen und Schwinden der Leinwand als Ursache von Schäden in der Malschicht und stellten Beobachtungen zusammen, inwieweit Vorleimung, Grundierung und Malschicht darauf Einfluss nehmen. Sie stellen den damaligen Stand der Kenntnisse dar, die auf Beobachtungen und dem Studium originaler Gemälde beruhten. Insgesamt wurde der Feuchte ein hohes Schädigungspotential zugesprochen, weshalb viele Restauratoren bis zum Ende der 1960er und frühen 1970er Jahre glaubten, eine langfristige Erhaltung von Leinwandgemälden sei durch das Imprägnieren mit hydrophoben Klebemitteln in Form einer Wachs-Harz-Doublierung möglich.[58]
Diese Haltung veränderte sich, weil das Verhalten des Leinwandgemälde genau in dieser Zeit in den Fokus rückte, als die Aufbewahrungsbedingungen von Kunstwerken in den Sammlungen thematisiert wurden. Innerhalb dieser Entwicklung wurden erste Klimastandards entwickelt.[59] Die relevanten Aspekte für das Leinwandgemälde wurden 1965 in dem Artikel „*Erhaltungsmaßnahmen am Leinwandbild*“ [60] von Straub zusammengetragen. Das 1978 von Thomson erschienene Buch „*The Museum Environment*“ [61] stellte erstmalig die Wechselwirkungen von Kunstwerken mit

54 Siehe Fußnote 46.
55 Young 2005.
56 Frimmel 1904, S. 100—101.
57 Eibner 1928.
58 Ackroyd 2005.
59 Atkinson 2014.
60 Straub 1965.
61 Thomson 1978.

den Umgebungsbedingungen aus natur- und materialwissenschaftlicher Sicht dar. Seine Diskussion zu den Aufbewahrungsbedingungen von Kunstwerken basierte auf dem Verhalten der einzelnen Materialien, soweit bis dahin bekannt. Diese Anfänge der präventiven Konservierung erhöhten die Sensibilität hinsichtlich der Wechselwirkung der Kunstgegenstände mit den Umgebungsbedingungen. So fanden sich in einem weiteren Standardwerk zur präventiven Konservierung „*Conservation and exhibitions: packaging, transport and environmental considerations*“ [62] 1987 von Stolow publiziert, die ersten Werte zur Menge aufgenommener Feuchte von Geweben anhand von Sorptionsisothermen.
Parallel zu der Entwicklung der präventiven Konservierung fanden Debatten über die Notwendigkeit der Doublierung von Leinwandgemälden statt. Diese beiden Entwicklungen brachten vermehrt Fragestellungen zum hygrischen Verhalten einzelner Materialien, so auch zum Leinwandgemälde hervor. Von diesem Fragestellungen motiviert, wurde die Forschung zum mechanisch physikalischen Verhalten von Leinwandgemälden aufgenommen. Die Entwicklung dieser Forschung in Bezug auf das Leinwandgemälde als physikalische Struktur ist von Keyser in ihrem Artikel “*Restraint without stress, History and prospects: a literature review of paintings as structures*“ [63] für den Zeitraum bis 1984 zusammengetragen worden.

Eigens zum Studium des Verhaltens des Leinwandgemäldes durchgeführte Experimente wurden erstmals von Du Pont Cornelius 1967 veröffentlicht.[64] Sie bilden den Auftakt einer Reihe von Studien, die sich mit dem mechanisch physikalischen Verhalten des Leinwandgemäldes auseinander setzten. An unterschiedlich vorgeleimten und grundierten Leinwänden wurden Spannungen aufgezeichnet, die durch Dimensionsänderungen aufgrund von Sorption und Desorption entstanden. 1978 veröffentlichte Kuzmitch eine Untersuchung, welche die Entwicklung von Deformationen aufgrund wechselnder Umgebungsfeuchten beleuchtete.[65] Aufgrund fehlender Diagramme im Abdruck kann diese Studie jedoch nur bedingt ausgewertet werden. Mecklenburg wählte einen ähnlichen Versuchsaufbau wie Du Pont Cornelius, um verschiedene, im Leinwandgemälde vorkommenden Schichten einzeln in ihrem Verhalten, bei wechselnden Umgebungsbedingungen zu untersuchen. Seine Materialproben waren dabei uniaxial gespannt bzw. frei hängende Streifen. Aus diesen Ergebnissen berechnete er computergestützt ein modellhaftes Verhalten des gesamten Leinwandgemäldes und überprüfte dieses anhand eines originalen Gemäldes aus dem 19. Jh. Seine ersten Ergebnisse fasste Mecklenburg 1982 in einem unveröffentlichten Untersuchungsbericht unter dem Titel „*Some aspects of the mechanical behavior of fabric supported paintings*“ [66] zusammen. Das methodische Vorgehen wurde von Mecklenburg in den folgenden Jahren weitergeführt und in unterschiedlichen Beiträgen veröffentlicht. Die aktuellste Darstellung seiner Resultate erschien 2005 in dem Tagungsbeitrag „*The*

62 Stolow 1987.
63 Keyser 1984.
64 Du Pont Cornelius 1967.
65 Kuzmitch 1978.
66 Mecklenburg 1982.

structure of canvas supported paintings".[67] Die von Mecklenburg untersuchten Materialien werden heute im Archiv des Smithsonian's Museum Conservation Institute (USA) verwahrt und dienen weiterhin der Forschung.

Anfang der 1980er Jahre veröffentlichte Berger unter dem Titel „*The role of tension in the preservation of canvas paintings: a study of panoramas*" [68] seine Beobachtungen an einem großen Panoramagemälde, die ihn vermuten lies, dass die im Gemälde wirkende Spannung maßgeblich den Erhaltungszustand der Gemälde beeinflusst. Um diesen Zusammenhang zu untersuchen, führte er zusammen mit Russell in den 1980er und 1990er Jahren eine Vielzahl von Experimenten durch.[69] Erstmals entwickelten sie für diesen Zweck eine Vorrichtung, die eine biaxiale Aufspannung für diese Studien am Leinwandgemälde ermöglichte. Wie Mecklenburg auch, dokumentierten sie das Verhalten der Proben in Form von Spannungen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen. Sie haben eine Vielzahl von Publikationen dazu verfasst, die sich in ihren Ergebnissen jedoch nur leicht unterschieden und vor allem im Zusammenhang mit der Weiterentwicklung ihres biaxialen Spannungsprüfers stehen. Eine deutschsprachige Zusammenfassung ihrer Ergebnisse publizierten sie 1989 unter dem Titel „*Untersuchungen zum Einfluß der Umwelt auf die Erhaltung von Leinwandgemälden*".[70]

Hedley betrachtete mit seinen Versuchen nicht die einzelnen Schichten des Leinwandgemäldes, sondern untersuchte an historischen Proben ganze Gemälde in ihrem Verhalten gegenüber wechselnden Umgebungsfeuchten und dokumentierte dieses ebenfalls durch die aufgezeichnete Spannung.[71] Ein Interessensschwerpunkt von Hedley war dabei die Frage, welche Bildträger zum Schrumpfen neigen und wann sie dies tun. In einem von Villers unter dem Titel „*The practicalities of the interaction of moisture with oil paintings on canvas*" [72] zu einem späteren Zeitpunkt herausgegebenen Manuskript, welches auf 1989 datiert wird, fasst Hedley seine Sicht auf das hygrische Verhalten von Leinwandgemälden grundlegend zusammen. Erstmalig wurden Bezüge zur Menge der aufgenommenen Feuchte hergestellt, was anhand einer Sorptionsisotherme erfolgte.

Schaibles „*Neue Überlegung zur Feuchtigkeit am Leinwandbild*" [73] bereicherte 1987 die bis dahin vorliegenden Studien vor allem aufgrund seiner Beschäftigung mit der Frage, auf welche Art und Weise sich die Feuchteaufnahme und der Feuchtetransport im Leinwandgemälde vollziehen. Er führte erstmalig eine differenziertere Betrachtung des hygrischen Verhaltens ein, was sich nicht auf die mechanischen Auswirkungen beschränkte. Dadurch wurden grundlegende Lücken offenbar, die den bisherigen Untersuchungen fehlten.

---

67 Mecklenburg 2005.
68 Berger 1981.
69 Unter anderem in Russell/Berger 1982 und Berger/Russell 1984.
70 Berger/Russell 1989.
71 Hedley 1988.
72 Hedley 1993.
73 Schaible 1987.

Im Rahmen der 1991 durchgeführten Tagung „*Art in Transit*“ fasste MICHALSKI in seinem Beitrag „*Paintings: Their response to temperature, relative humidity, shock, and vibration*“ [74] die Zusammenhänge über das mechanische Verhalten des Leinwandgemäldes zusammen und stellte dieses in den Kontext der industriellen Farb- und Polymerwissenschaft. Die dafür leitende Frage war, wie viel Spannung im Leinwandgemälde entsteht, aufgrund von wechselnden Umgebungsbedingungen. Dabei lies er jedoch den textilen Bildträger für seine Berechnungen gänzlich außer Acht, weil er der Ansicht war, dass er zum mechanischen Verhalten keinen Beitrag leistet.

Bis zu der Tagung „*Art in Transit*“ im Jahre 1991 standen der Konservierungswissenschaft eine Reihe von Untersuchungen zur Verfügung, die das Leinwandgemälde hinsichtlich ihres mechanisch physikalischen Verhaltens beleuchtete. Die leitenden Fragestellungen waren dabei, wie viel Spannung im Gemälde aufgrund von wechselnden Umgebungsbedingungen entsteht und welche Spannungen Schäden im Gemälde verursachen. Die Auswahl der untersuchten Materialien beschränkte sich auf die Leinwand, unterschiedliche Vorleimungen aus Glutinleim, Öl basierte Grundierungen und ebenfalls Öl basierte Malschichten. Originale Materialien, die in die Untersuchungen einbezogen wurden, stammten aus dem 19. Jh. Die daraus abgeleiteten Erkenntnisse prägen bis heute das Verständnis über das Verhalten eines Leinwandgemäldes. Die Schwierigkeit bei der Interpretation dieser Ergebnisse ist, dass durch das komplexe Zusammenspiel und die sich gegenseitig beeinflussenden Faktoren, sowie der Vereinfachung der Versuchsanordnung, Ergebnisse oft nicht repräsentativ sind und die Übertragung auf den realen Fall nicht möglich ist.

Aus den gesammelten Beobachtungen entwickelte sich in Bezug auf die durchzuführenden Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen ein besonderes Interesse an Doublierungen, die den Bildträger versteifen sollten. Die zugrunde liegende Theorie war die Annahme, dass die Malschicht nur unversehrt bleiben kann, wenn sie flexibler als der Bildträger ist.
Offene Forschungsfragen wurden von den genannten Autoren selten formuliert. Lediglich SCHAIBLE eröffnete durch seine Fragestellungen wegweisende Forschungsfelder, die seiner Meinung nach bis dato unberücksichtigt geblieben waren.

In den 1990er Jahren begann sich die Forschungstätigkeit etwas weiter zu differenzieren. Zum einen wurde die Forschung zum mechanisch physikalischen Verhalten des Leinwandgemäldes zunächst durch die Dissertation von YOUNG mit dem Titel „*Measurement of the Biaxial Tensile Properties of Paintings on Canvas*“ [75] weiter geführt. Zusammenhänge mit dem hygrischen Verhalten spielten dort jedoch eine untergeordnete Rolle.
Zum Anderen wurden neue Aspekte in die Forschungstätigkeit eingebracht. Ein wichtiger Beitrag in diesem Zusammenhang war das Aufbereiten von chemischem und textiltechnischem Wissen für die Konservierungswissenschaft, zunächst durch BALLARDS Artikel „*Hanging out.*

74 MICHALSKI 1991.
75 YOUNG 1996.

Strength, elongation and relative humidity: some physical properties of textile fibres“ [76]. Kurz darauf wurde von Tímár-Balázsy und Eastop ein Fachbuch für die Textilkonservierung unter dem Titel „*Chemical principles of textile conservation*“ [77] publiziert, welches chemische und textiltechnische Grundlagen zum Aufbau, Eigenschaften und Verhalten von Textilien umfasst. Auf das hygrische Verhalten von Textilfasern konzentriert, erschien ebenfalls von Tímár-Balázsy der Tagungsbeitrag mit dem Titel „*Drying behaviour of fibres*“ [78]. Mit den genannten Beiträgen lagen der Konservierungswissenschaft erstmalig die chemischen Grundlagen über die Bindung von Wassermolekülen in Faserstoffen und dadurch verursachten Veränderungen im Material vor. Damit einhergehend wurden auch die Desiderate offen gelegt. So formulierte Worch 1996 den Wunsch einen „ […] Kausalzusammenhang aufzustellen zwischen Alterungsgrad einer Faser mit dem entsprechenden Gehalt an strukturell gebundenen Wasser einerseits und den physikalischen Eigenschaften der Gewebe andererseits als Grundlage für Konservierungsmethoden.“[79]
Erstmalig fanden in den 1990er Jahren Experimente zum hygrischen Verhalten des Leinwandgemäldes statt, die nicht in Zusammenhang mit der Entwicklung von Spannungen standen. Im Umkreis von Odlyha wurden verschiedene Untersuchungen publiziert, die sich erstmalig mit der Menge der aufgenommenen Feuchte beschäftigten. Leitende Fragestellungen waren dabei, wie die einzubringende Feuchte am Leinwandgemälde kontrolliert werden kann und wie die Materialfeuchte auch an originalen Leinwandgemälden zerstörungsfrei erfasst werden kann. Dafür eingesetzt wurden die Thermomechanische und die Dielektrische Analyse.[80]
Bilson bereicherte das damalige Wissen durch seinen Artikel „*Canvas shrinkage: a preliminary investigation into the response of a woven structure*“ [81] mit einem weiteren neuen methodischen Ansatz: die bisher zweidimensionalen Daten, wie sie durch uni und biaxiale Aufspannungen generiert wurden, sollten in die dritte Dimension erweitert werden. Mit Hilfe einer CCD Kamera erfasste er berührungsfrei die Dimensionsänderungen vom textilen Bildträger. Dieser Ansatz stellte erstmals nicht die Spannungen in den Vordergrund, sondern die durch Sorption und Desorption verursachten Dimensionsänderungen.

Ende der 1990er Jahre widmete sich Ackroyd dem Themengebiet des hygrischen Verhaltens des Leinwandgemäldes, erstmalig vor dem Hintergrund der Anwendung von Feuchte im konservatorisch, restauratorischen Einsatz. Er veröffentlichte 1998 mit seinem Beitrag „*Past and present methods for the removal of severe distortions in canvas paintings*“ [82] eine historische Übersicht über den Einsatz von Feuchte am Leinwandgemälde im konservierungstechnischen Kontext. Darüber hinaus fasste er den damaligen Stand der Forschung zum mechanischen Verhalten des Leinwandgemäldes zusammen und bemängelte in den bis dato publizierten Untersuchungen

76 Ballard 1996.
77 Tímár-Balázsy/Eastop 1998.
78 Tímár-Balázsy 1999.
79 Worch 1996.
80 MacBeth et al. 1993, Chan et al. 1994, Chan et al. 1995, Odlyha et al. 1996.
81 Bilson 1996.
82 Ackroyd 1998.

die Einseitigkeit der verwendeten Ausgangsmaterialien. 2002 veröffentlichte er Ergebnisse einer Umfrage zum aktuellen Umgang von Feuchte am Leinwandgemälde durch Restauratoren.[83] Darüber hinaus thematisierte er ebenfalls 2002 welchen Einfluss die zum Leinwandgemälde geleisteten Forschungsergebnisse auf den konservierungstechnischen Einsatz von Feuchte haben.[84] Aus diesen Zusammenhängen wurde klar, dass dem relativ häufigen Einsatz von Feuchte am Leinwandgemälde ein erschreckend geringer Wissenstand über die Wirkungsmechanismen von Feuchte und Wasser in der Leinwand und dem Gemälde gegenüber steht.

Zu Beginn des 21. Jhs. entstanden an der HfBK Dresden unter der Betreuung von Prof. Heiber einige Seminararbeiten, die sehr konkrete offene Fragestellungen im Wissen um das Verhalten degradierter Bildträger behandelten.[85] Der Anlass waren vor allem praxisorientierte Fragestellungen, u. a. die Dehnbarkeit und die Dimensionsänderungen degradierter Leinwände bei erhöhter Feuchte und Temperatur. Erstmalig wurden vom Verhalten der Leinwand Bezüge zur Gewebegeometrie hergestellt. Es wurden relevante Aspekte untersucht und wichtige methodische Ansätze entwickelt. Heiber selbst thematisierte das hygrische Verhalten des textilen Bildträgers in seiner Veröffentlichung über den Gleitholzrahmen 2006.[86]
Die 2005 in Valencia durchgeführte Tagung „*Canvases: behaviour, deterioration and treatment*“ [87] blieb in Bezug auf das mechanisch physikalische Verhalten des Leinwandgemäldes im Großen und Ganzen auf dem Stand der Erkenntnisse von 1991. Eine Erweiterung der Erkenntnisse wurde durch den Beitrag von Roche durch die Darstellung seiner biaxialen Versuche zum Verhalten von Leinwandgemälden geleistet: Erstmalig wurden vollständige Leinwandgemälde mit bekannter Zusammensetzung untersucht, die eine Leim-Kreide-Grundierungen im Aufbau berücksichtigten.[88] Bisherige Untersuchungen bezogen sich ausschließlich auf Grundierungen auf der Basis von Öl.
Zeitgleich wurde auch seitens der Methodik der Stand der Forschung durch Dulieu-Barton et al. publiziert.[89] Die Zusammenstellung umfasst Methoden, wie Spannungen und Deformationen an Kunstwerken gemessen werden können.
Haller entwarf 2007 eine Projektskizze, bei der im Vordergrund stand, das Quellen und Schwinden des textilen Bildträgers auf unterschiedlichen Strukturebenen optisch auszuwerten.[90]
Eine erstmalige und bisher einmalige Revision der in den 1980er und 1990er Jahren entstandenen Ergebnisse von Hedley, Berger/Russell und Mecklenburg fand innerhalb der 2010 veröffentlichten Diplomarbeit „*Untersuchungen zum feuchtephysikalischen Verhalten von Gemälden auf*

83 Ackroyd et al. 2002.
84 Ackroyd 2002.
85 Schrei 2003, Tost 2005, Neufert 2006, Bennke 2007.
86 Heiber 2006.
87 Castell Agustí et al. 2005.
88 Roche 2005.
89 Dulieu-Barton et al. 2005.
90 Haller 2007.

textilem Bildträger unter biaxialer Dehnung“ [91] durch Lipinski unter der Betreuung von Schaible statt. Darin wurden einige bis dahin gültige Annahmen zum Verhalten von Leinwandgemälden widerlegt.

Andersen legte mit ihrer Dissertation eine Studie vor, die sich mit dem hygrischen Verhalten Dänischer Gemälde des 19. Jhs. beschäftigt und wie dieses Verhalten durch unterschiedliche Doublierungen beeinflusst wird.[92] Dabei liegt den Untersuchungen dieselbe Annahme zugrunde, wie sie bereits als Fazit der in den 1980er und 1990er Jahren durchgeführten Studien zur Spannung im Leinwandgemälde geschlussfolgert wurden: dass Leinwandgemälde nur durch eine möglichst steife, tragende Schicht unterstützt werden können, um Schäden in der Malschicht zu vermeiden. Dementsprechend bevorzugt Andersen versteifende Doublierungsmethoden und lehnt minimalinvasive Methoden, wie eine Anränderung ab. Demgegenüber formulierte Ackroyd bereits 2005 dass für eine derartige Beurteilung der Langzeitstabilität der unterschiedlichen Herangehensweisen bisher zu wenig Untersuchungen vorliegen.[93]

Eine wieder aufkommende Debatte um Klimawerte zur Aufbewahrung von Kunstwerken entwickelte sich von 2008[94] an und führte 2012 zu der internationalen Tagung „*Climate for Collections*“ [95] in München. Eine Einigung zu verbindlichen Standards ist bis heute nicht erfolgt. Als ein Grund kann sicherlich die Unsicherheit über die einzelnen Verhaltensweisen der Kunstwerke gegenüber wechselnden Umgebungsbedingungen genannt werden. Dies bringen Burmester/Eibl in ihrer „*Münchner Positionen zu Klima und Kulturgut*“ zum Ausdruck, indem sie feststellen, dass der Stand der Forschung noch nicht an dem Punkt angelangt ist, an dem belastbare Aussagen zu Klimaschwankungen und deren Auswirkungen auf einen allgemein gültigen Punkt gebracht werden können.[96] Genauso wie die aktuelle Debatte bisher die Wissenslücken aufzeigte, so entstanden daraus ebenso neue Beiträge zur Klärung dieser. In diesem Sinne ist die 2016 unter dem Titel „*Der Einfluss von Klimaschwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext*“ [97] publizierte Dissertation von Holl zu sehen. Erstmalig wurde das Verhalten verschiedener Kunstgegenstände aus unterschiedlichen Perspektiven untersucht. Dazu gehörte das Aufzeichnen von Sorptionsisothermen, die Erfassung von Dimensionsänderungen, kombiniert mit der Beobachtung von Veränderungen bzw. Schäden. Kern der Untersuchung war die Auswirkungen von klimatischen Kurzzeitschwankungen auf Kunstwerke.

Der aktuelle Forschungsstand zum Verhalten des Leinwandgemäldes wurde während der jüngsten Tagung 2016 unter dem Titel „*Physical Issues in the Conservation of Paintings: Monitoring,*

91 Lipinski 2010.
92 Andersen 2013.
93 Ackroyd 2005, S. 182.
94 Atkinson 2014, S. 206.
95 Ashley-Smith et al. 2013.
96 Burmester/Eibl 2014.
97 Holl 2016.

Documenting and Treatment" in Paris vorgestellt, einem Interim Meeting des ICOM-CC.[98] Wie dem Titel der Tagung zu entnehmen ist, standen vor allem die mechanisch physikalischen Vorgänge von Gemälden im Vordergrund. In Bezug auf das hygrische Verhalten von Leinwandgemälden wurden keine nennenswerten neuen Erkenntnisse vorgestellt.

Gänzlich unberücksichtigt blieb bisher in der Konservierungswissenschaft der Einfluss der textiltechnischen und kunsttechnischen Vorbehandlung des Gewebes auf sein hygrisches Verhalten. Auch wie der Grad der Alterung darauf Einfluss nimmt, ist bisher nur in Ansätzen aufgegriffen worden. Darüber hinaus fehlen bisher Daten zur Menge der aufgenommenen Feuchte und der daraus resultierenden Dimensionsänderungen. Die Ergebnisse, die zum mechanischen Verhalten des Leinwandgemäldes vorliegen, beschränken sich auf eine relativ kleine Auswahl von Materialien, die nicht verallgemeinernd auf das Leinwandgemälde übertragen werden können.

Führt man sich vor Augen, welche Relevanz Feuchte am Leinwandgemälde hat, liegen erschreckend wenige Kenntnisse über das hygrische Verhalten vor.

98 Physical Issues in the Conservation of Paintings: Monitoring, Documenting and Treatment. ICOM-CC Interim Meeting 29—30 September 2016, Paris. Eine Veröffentlichung der Zusammenfassungen der Beiträge ist auf der Website der Tagung geplant. (https://physicalissuespaintings2016.wordpress.com)

3 Von der Cellulose zum Leinwandgemälde: Einflussfaktoren auf das hygrische Verhalten der Leinwand

Das hygrische Verhalten des textilen Bildträgers eines Leinwandgemäldes wird maßgeblich von seinem Aufbau bestimmt. Für das Verständnis ist es unerlässlich, diesen Aufbau im Detail zu schildern. Sowohl Aufbau als auch hygrisches Verhalten des textilen Bildträgers sind sehr komplex, weshalb der erste Abschnitt dieses Kapitels eine vereinfachte Übersicht zu beiden Aspekten beinhaltet (Abschnitt 3.1). Dazu werden relevante Begriffsdefinitionen gegeben. Die daran anschließenden Abschnitte sollen anhand des Aufbaus und der Herstellung des textilen Bildträgers erläutern, wie es zu dem beschriebenen hygrischen Verhalten kommt. Dabei folgt der Text der Hierarchie des Aufbaus des textilen Bildträgers, beginnend beim kleinsten Element, endend mit seiner Degradation. Nicht in jedem Fall wurden die herangezogenen Untersuchungen zur Erklärung des Aufbaus an der gleichen strukturellen Ebene durchgeführt. Dadurch ist es zu erklären, dass z. B. für die Beschreibung bestimmter Merkmale der Faser, Daten eines Garns herangezogen werden.
An relevanten Stellen werden die auf das hygrische Verhalten Einfluss nehmenden Faktoren benannt. Dabei werden der derzeitige Kenntnisstand wiedergeben und noch bestehende Wissenslücken aufgezeigt. Auf diese Weise wird eine Differenzierung zwischen allen Strukturebenen des Aufbaus vorgenommen, was in dieser Form bisher noch nicht erfolgt ist.
Die ausgewerteten Quellen entstammen den Bereichen der Celluloseforschung, der Textil-, Holz- und Papiertechnik sowie der Konservierungswissenschaft.
Der Schwerpunkt dieser Arbeit liegt auf dem Verhalten des textilen Bildträgers aus Flachs. Weil dieses maßgeblich von den aufliegenden Grundierungs- und Malschichten mit bestimmt wird, findet auch das Leinwandgemälde als Materialverbund Betrachtung. Die Beschäftigung mit dem Verhalten von Grundierungs- und Farbschichten ist ein für sich komplexes und lohnenswertes Forschungsgebiet. Die Recherche zu diesem Thema beschränkt sich in dieser Arbeit auf die publizierten Kenntnisse der Konservierungswissenschaft, ohne zu diesem Thema weiterführende Recherchen z. B. innerhalb der Polymerwissenschaft oder Lacktechnologie zu betreiben.

3.1 Grundlagen und Begriffsdefinitionen

3.1.1 Begriffsdefinitionen und grundlegender Aufbau der Leinwand

Das Leinwandgemälde setzt sich in der Regel aus dem aufgespannten textilen Bildträger und den darauf in unterschiedlicher Schichtdicke und variierender Anzahl liegenden Schichten zusammen: Vorleimung, Grundierung, Malschicht und Firnis. Es handelt sich dabei um eine Vereinfachung, aufgrund der künstlerischen Vielfalt kann man nicht von einem standardisierten Aufbau ausgehen.
Der textile Bildträger kann aus verschiedenen Faserstoffen hergestellt sein. Der Begriff *Leinwand* steht im allgemeinen Sprachgebrauch für den textilen Bildträger, unabhängig vom verarbeiteten Faserstoff. Die eigentliche Wortbedeutung meint hingegen, dass Leinen, also Flachsfasern, als Ausgangsstoff verwendet wurde. Auch in der Konservierungswissenschaft wird der Begriff *Leinwand* nicht nur für Flachsgewebe verwendet, insofern kann er nicht zuverlässig als Materialangabe aufgefasst werden. Innerhalb der vorliegenden Arbeit steht der Begriff *Leinwand* für den textilen Bildträger aus Flachsfasern. Materialübergreifend wird vom *textilen Bildträger* gesprochen. Gewebe aus Flachs, die nicht im kunsttechnologischen Kontext beschrieben werden, werden als *Flachsgewebe* bezeichnet.

Für die Herstellung der Leinwand werden Garne senkrecht zueinander verwebt. Die Garne werden aus den technischen Fasern gesponnen, welche aus den Stängeln der Flachspflanze gewonnen werden.
Der grundlegende Aufbau und die Position der Fasern im Stängel der Pflanze sind in Abb. 3.1, S. 36 dargestellt.
Die Fasern liegen gebündelt im Stängel der Flachspflanze (*Linum usitatissimum* L.), in dem sie als Stützgewebe fungieren und zu den Bastfasern zählen. Ein solches Faserbündel setzt sich aus mehreren Einzelfasern, den Elementarfasern zusammen. Für ihre Verarbeitung werden die Faserbündel aus dem Stängel der Pflanze herausgelöst. Textiltechnisch verarbeitet werden Bündel von ca. 10—30 Elementarfasern, die technische Faser genannt werden. Eine Elementarfaser ist eine lang gestreckte Zelle, deren Querschnitt mit einem 3—7 kantigen Prisma verglichen wird. Ihre Größe variiert stark. Es wurden Längen zwischen 1 und 100 mm (häufig 20—40 mm) und Breiten zwischen 19 und 33 µm gemessen. Sie bestehen aus der dreischichtigen Zellwand und einem kleinen mittigen Hohlraum, dem Lumen. Die Mittellamelle verklebt die einzelnen Elementarfasern miteinander (siehe auch Abb. 3.1, S. 36).[99]
Die Zellwände der Elementarfaser unterscheiden sich in ihrer Dicke und Zusammensetzung. Cellulose ist der Hauptbestandteil der Zellwand. Ihr Anteil schwankt nach verschiedenen Au-

99 Dambroth/Seehuber 1988, S. 18.

toren zwischen 64,1 % und 71 %.[100] Ihre langen, unverzweigten Molekülketten aus Glucosemolekülen ordnen sich zum einen in hoch geordnete kristalline Bereiche an, die Micellen genannt werden. Zum anderen liegen sie in weniger geordneten, amorphen Bereichen vor. In diesem Wechsel bilden sie fibrilläre Strukturen. Mikro- und Makrofibrillen liegen in der Primärwand regellos in einer Matrix aus Hemicellulose und Pektin, während sie in der Sekundärwand dicht gepackt, parallel in einem bestimmten Winkel zur Faserlängsachse angeordnet sind, umgeben von Hemicellulose und Lignin.[101]

Cellulose ist als faserbildendes Polymer auch Bestandteil anderer Pflanzenzellwände. Abhängig von der pflanzlichen Herkunft kommt sie zusammen mit den oben genannten Begleitsubstanzen in unterschiedlichen Mengenverhältnissen vor. Als Faserrohstoffe zur Herstellung von Textilien und Papier können neben Flachs z. B. Holzfasern, Hanf- und Baumwollfasern genannt werden. Diese aus verschiedenen Pflanzen isolierte Cellulose wird *native Cellulose* genannt. Dies dient der Abgrenzung zu den synthetisch hergestellten Cellulosederivaten und den auf Cellulose basierenden Chemiefasern.[102]

100 Siehe Tabelle 3.4, S. 57.
101 Kölln 2004, S. 5—13; Wülfert 1999, S. 255—256.
102 Klemm et al. 2005.

Molekulare Ebene

2 Glucosemoleküle bilden die Cellobiose, mehrere hunderte bis zehntausende Cellobioseeinheiten bilden ein Cellulosemolekül.

Supramolekulare Ebene

Cellulosemoleküle liegen sowohl parallel zueinander (kristalline Micelle), als auch ungeordnet als amorphe Bereiche. Die Fransen-micellen enthalten beide Zustände und liegen in der Mikrofibrille.
Breite: 3—30 nm
Länge: mehrere 100 nm

Morphologische Ebene

Mehrere Mikrofibrillen bilden eine Makrofibrille.
Breite: 10—50 nm
Länge: erreicht den Bereich der Mikrometer.

Die Elementarfaser setzt sich aus drei Zellwand-schichten zusammen, die sich durch unterschiedliche Orientierung der Makrofibrillen unterscheiden.
M: Mittellamelle
P: Primärwand
S_1: Sekundärwand 1
S_2: Sekundärwand 2
T: Tertiärwand
L: Lumen
Breite: 19—33 µm
Länge: 1—100 mm
10—30 Elementarfasern werden durch die Mittellamelle zu einer technischen Faser verklebt .

Flachspflanze

Unter der äußeren Schicht des Faserstängels liegen die Elementarfasern in Bündeln vor (Bastfasern). Durchmesser des Faserstängels: 0,6—3 mm.

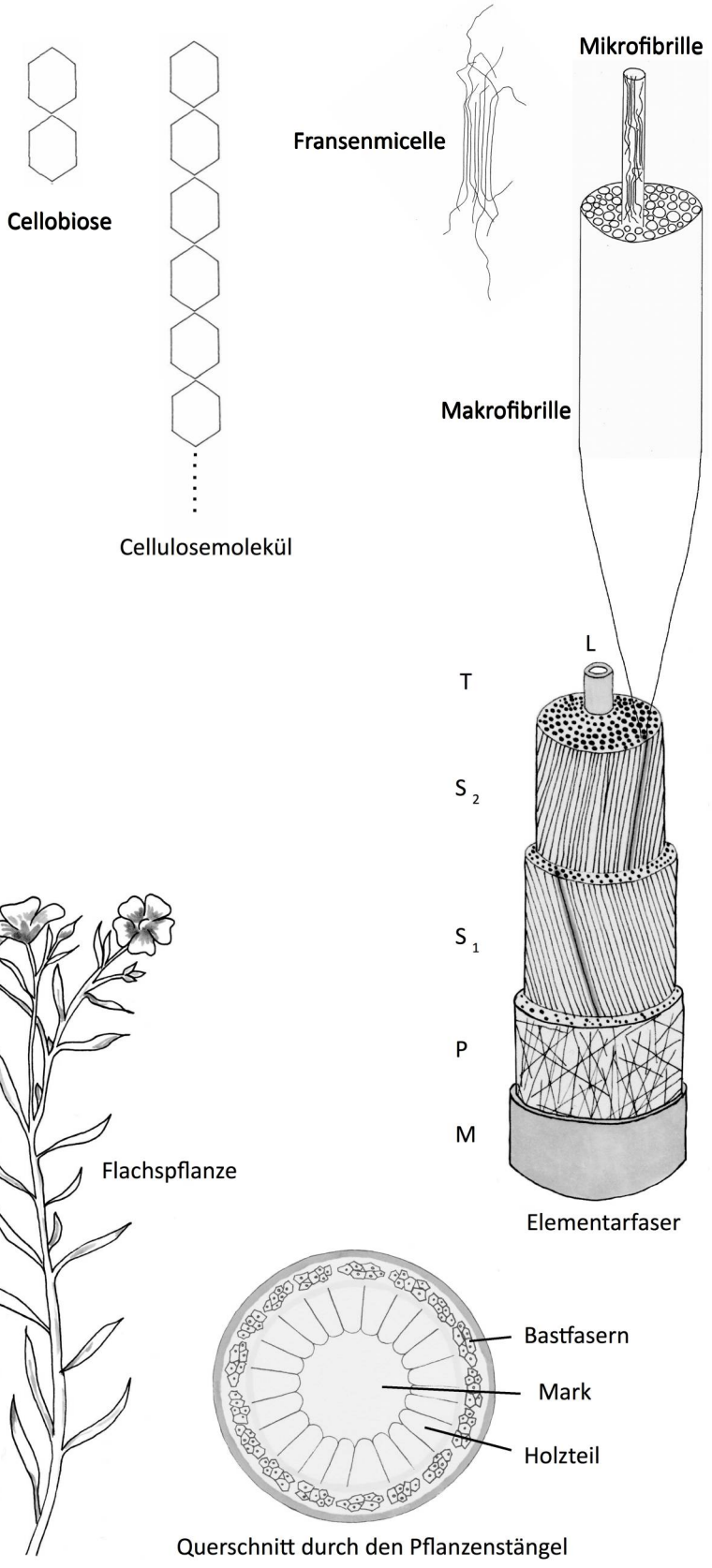


Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau und Zusammensetzung der Elementarfaser von Flachs und ihre Position im Pflanzenstängel.

3.1.2 Begriffsdefinitionen und Grundlagen des hygrischen Verhaltens der Leinwand

Im Folgenden werden die Grundprinzipien des hygrischen Verhaltens der Leinwand beschrieben. Dabei meint der Begriff *Feuchte*, in oder auf festem Stoff ein- oder angelagerte Flüssigkeit.[103] Feuchte kann sowohl als Wasserdampf als auch als flüssiges Wasser eindringen.
Die Sorption von Feuchte in die Leinwand erfolgt prinzipiell in zwei Schritten. Zunächst wird der Wasserdampf an der Oberfläche angelagert (*Adsorption*) und dringt dann allmählich in den gesamten Faserverbund ein (*Absorption*). Die Adsorption vollzieht sich innerhalb weniger Sekunden, während die Absorption wesentlich langsamer abläuft, in der Regel mehrere Stunden. Dabei dringt der Wasserdampf durch Diffusion aufgrund von Konzentrationsgefällen in die zwischenmolekularen Räume. Die Geschwindigkeit verringert sich mit der Annäherung an den Gleichgewichtszustand. Die Unterscheidung zwischen der Ad- und Absorption ist oftmals schwer bis unmöglich und in der hier vorgestellten Untersuchung auch nicht immer relevant. Deshalb ist es aus praktischer Sicht und im Folgenden ausreichend, im allgemeinen Falle der Wasserdampfaufnahme den Begriff der *Sorption* zu verwenden, womit beide Arten der Anlagerung zusammengefasst werden.[104]
Die Sorptions- und Desorptionseigenschaften der Leinwand basieren maßgeblich auf dem Grundelement der Flachsfasern, der Cellulose. Cellulose ist sehr hygroskopisch und durch Wassermoleküle quellbar, ohne jedoch in Lösung zu gehen.[105] Ob die Leinwand durch Wasserdampf oder flüssiges Wasser gequollen wird, ruft unterschiedliche Reaktionen hervor. Aus diesem Grund ist es sinnvoll, begrifflich zwischen der *Trockenquellung* (Wasserdampf) und der *Nassquellung* (flüssiges Wasser) zu differenzieren.[106]
Wassermoleküle dringen in alle Zwischenräume innerhalb des Gewebes, des Garns und der technischen Faser. Sie dringen in die Zellwand der Elementarfaser ein. Dort können sie innerhalb der Mikrofibrillen in den amorphen Bereichen, also zwischen den Micellen, an Cellulosemoleküle gebunden werden.[107] Drei verschiedene Bindungsarten kommen dafür in Betracht:[108]

1. Chemisorption der Wassermoleküle an den Hydroxygruppen der Cellulose (Monomolekulare Schicht/Monolayer).

2. Bildung von ein- oder mehrschichtigen Wassermolekülen zwischen den Celluloseketten und an der inneren Oberfläche des Materials (multimolekular/Multilayer).

3. Freies Wasser und kapillare Kondensation im Porensystem.

---

103 Bobeth 1993, S. 231.
104 Vrgl. Bobeth 1993, S. 233—234.
105 Klemm et al. 1998, S. 45.
106 Bobeth 1993, S. 233.
107 Hearle 1960b, S. 12.
108 Klemm et al. 1998, S. 46.

Der wesentliche Unterschied zwischen diesen Bindungsformen ist die jeweilige Bindungsenergie. Monomolekular gebundenes Wasser ist sehr fest direkt an das Cellulosemolekül gebunden und wird nur durch extreme Trocknung entfernt. Wassermoleküle im Multilayer sind an die Wassermoleküle des Monolayers gebunden, jedoch weniger fest. Innerhalb des Multilayers zeigen alle Wassermoleküle die gleichen Eigenschaften. Das freie Wasser weist die geringste Bindungsenergie auf. Es ähnelt in seinen Eigenschaften dem flüssigen Wasser und liegt in Form von Clustern vor, die in ihrer Größe variieren und flexibel sind. Die Menge des freien Wassers ist eng mit der Porosität, also der Menge und Form vorhandener Zwischenräume, des Gewebes verknüpft.[109] Die verschiedenen Bindungsformen bauen nicht streng aufeinander auf, es handelt sich vielmehr um ein dynamisches Gleichgewicht, in dem die verschiedenen Bindungsformen in unterschiedlichen Anteilen nebeneinander auftreten. Dabei kommt es zu einer Verschiebung der Anteile in Abhängigkeit der Gleichgewichtsfeuchte des Materials.[110] Abbildung 3.2 zeigt eine modellhafte Einteilung der unterschiedlichen Bindungsformen.
Sorption und Desorption verursachen innerhalb der Cellulose Neuordnungen ihrer Struktur, weshalb Wechselwirkungen mit Wassermolekülen nicht immer reversibel sind.[111]

Wie viel Feuchte die Leinwand aus der unmittelbaren Umgebung aufnehmen kann, hängt neben den Materialeigenschaften selbst, von der umgebenden Temperatur und Luftfeuchte (*Umgebungsfeuchte*) ab. Die Umgebungsfeuchte wird in der Regel als *relative Feuchte* φ (rF) angegeben. Sie gibt das Verhältnis an zwischen der vorhandenen Wasserdampfkonzentration v zur maximal löslichen Wasserdampfkonzentration v_{sat} der Luft (auch *Sättigungsfeuchte*) bei einer gegebenen Temperatur.[112]

$$\varphi = \frac{v}{v_{sat}} \tag{3.1}$$

Die relative Luftfeuchte wird entweder in Prozent oder als Zahl angegeben.
Befindet sich ein Material im Gleichgewicht mit der Umgebungsfeuchte, stellt sich die jeweilige *Gleichgewichtsfeuchte* ein. Sie wird in der Regel in Prozent ausgedrückt und kann auf die Feucht- oder Trockenmasse bezogen werden. Bobeth definiert wie folgt:[113]

Feuchteanteil $$f = \frac{m_f - m_{tr}}{m_f} \tag{3.2}$$

Feuchtezuschlag $$u = \frac{m_f - m_{tr}}{m_{tr}} \tag{3.3}$$

m_f = Masse der Probe im feuchten Zustand
m_{tr} = Masse der Probe im trockenen Zustand

109 Hartley et al. 1992.
110 Klemm et al. 1998, S. 45—46.
111 Klemm et al. 1998, S. 45;
112 Klopfer/Homann 2008, S. 342.
113 Bobeth 1993, S. 232.

Eine Sorptionsisotherme stellt bei konstanter Temperatur für jede relative Feuchte der Umgebungsluft die Gleichgewichtsfeuchte des Materials dar. Die Sorptionsisotherme von Cellulose ist in Abbildung 3.2 dargestellt. Die Daten entstammen Messungen von Baumwolle, weil Baumwolle einen hohen Anteil von Cellulose enthält (82,7 %)[114]. Der grundlegende Verlauf der Isotherme ist allgemein für Cellulose natürlichen Ursprungs gültig und auch auf Flachs übertragbar. Jedoch können die Mengen der aufgenommenen Feuchte abhängig vom Ausgangsmaterial variieren. Die Aufnahme von Feuchte verläuft für Cellulose und für die auf Cellulose basierenden Stoffe nicht linear, wie die S-förmige Kurve der Sorptionsisotherme erkennen lässt. Die Form der Kurve liegt in den drei unterschiedlichen Bindungsarten der Wassermoleküle begründet.[115]

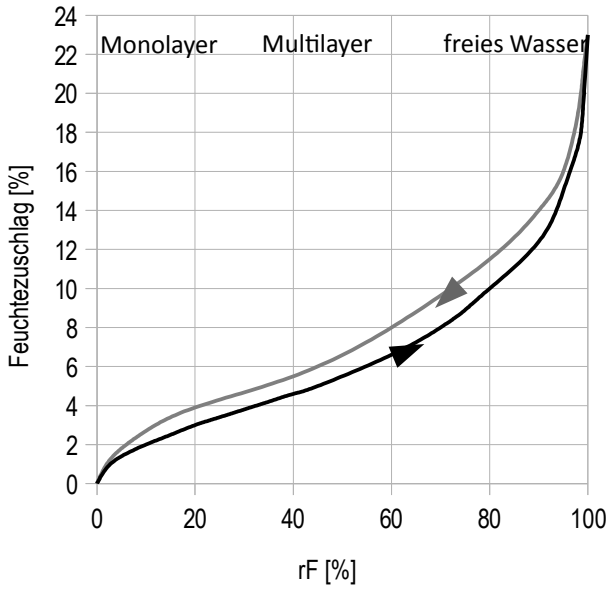


Abbildung 3.2: Sorptions- und Desorptionsisotherme von Baumwolle bei 25 °C mit Hysterese und Einteilung der Bindungsarten der Wassermoleküle.
Isotherme nach Urquhart 1960, S. 19, Bindungsarten des Wasser nach Lück 1964, S. 53.

Es ist ersichtlich, dass die Gleichgewichtsfeuchte bei einer bestimmten relativen Feuchte davon abhängt, ob es sich um einen Sorptions- oder Desorptionsvorgang handelt. Diese *Hysterese* kann zum einen auf Positionsänderungen von strukturellen Einheiten nach der erfolgten Quellung zurückgeführt werden und zum anderen auf besonders hartnäckige Wasserreste, die noch vorhanden sind.[116] Darüber hinaus spielt es ein Rolle, dass die Sorption eine exotherme Reaktion ist, also mit einer Wärmeentwicklung verbunden ist, während dem System für die Desorpti-

114 Turner 1949, S. P973.
115 Hermans 1949, S. 183—184.
116 Klemm et al. 1998, S. 46.

on Wärme zugeführt werden muss und daher langsamer abläuft.[117] Der Unterschied in der Gleichgewichtsfeuchte wird auch nach einer extremen Angleichzeit von drei Jahren nicht ausgeglichen.[118]

Die Trocknung, also die Desorption, von Leinwänden, wird von den Umgebungsbedingungen Temperatur, relative Feuchte und Luftgeschwindigkeit beeinflusst. Die Temperatur beeinflusst die Trocknung am stärksten. Sie entscheidet jedoch nicht nur über die Trocknungsgeschwindigkeit, sondern auch über die Höhe der nach der Trocknung resultierenden Gleichgewichtsfeuchte.[119] Mit steigender Temperatur, aber gleichbleibender relativer Feuchte, verringert sich sowohl während der Sorption als auch der Desorption die Gleichgewichtsfeuchte. Durch einen Anstieg der Temperatur wird der exotherme Sorptionsprozess zurückgedrängt, was die erhöhte Gleichgewichtsfeuchte erklärt. Bobeth benennt den Unterschied in der Gleichgewichtsfeuchte zwischen 20 und 25 °C mit kaum mehr als 0,25 % Feuchtezuschlag. Allerdings bezieht er sich nicht auf einen konkreten Faserstoff. Gleichzeitig wird der Unterschied zwischen Sorption und Desorption (Hysterese) geringer.[120] Die Beziehung zwischen erhöhter Temperatur bei gleichbleibender rF und sinkender Gleichgewichtsfeuchte zeigt Satlow für Flachs anhand von Desorptionsisothermen (s. Abb. 3.3). Dort beträgt der Unterschied der Gleichgewichtsfeuchten zwischen 60 und 90 °C ca. 3 %.

Urquhart hat für Baumwolle beobachtet, dass dieser Zusammenhang nur für Temperaturen zwischen 10—50 °C gilt. Bei höheren Temperaturen bis 110 °C gilt dieser Zusammenhang nur bis zu relativen Feuchten von ca. 85 %. Ab diesem Wert kommt es zu einem Umkehreffekt: je höher die Temperatur dann steigt, desto mehr Feuchte wird aufgenommen (siehe Abb. 3.4).[121] Allerdings ist dieser Umkehreffekt nicht bei den Sorptionsisothermen von Baumwolle erkennbar, die Bobeth wiedergibt.[122] Es kann an dieser Stelle nicht abschließend bewertet werden, woher diese Unterschiede kommen, und inwieweit sich diese Ergebnisse auf Flachs übertragen lassen. In der Konservierungstechnik sollte der Umkehreffekt keine wesentliche Rolle spielen, weil er sich erst ab 50 °C und ab 85 %rF zeigt. Selten werden textile Bildträger solch hohen Feuchten, kombiniert mit hohen Temperaturen ausgesetzt. Für Untersuchungen im Rahmen der Grundlagenforschung kann dies jedoch durchaus von Bedeutung sein und sollte gegebenenfalls geklärt werden.

117 Bobeth 1993, S. 234.
118 Urquhart 1960, S. 20.
119 Satlow 1951.
120 Bobeth 1993, S. 234, 237—239.
121 Urquhart 1960, S. 19.
122 Bobeth 1993, S. 238.

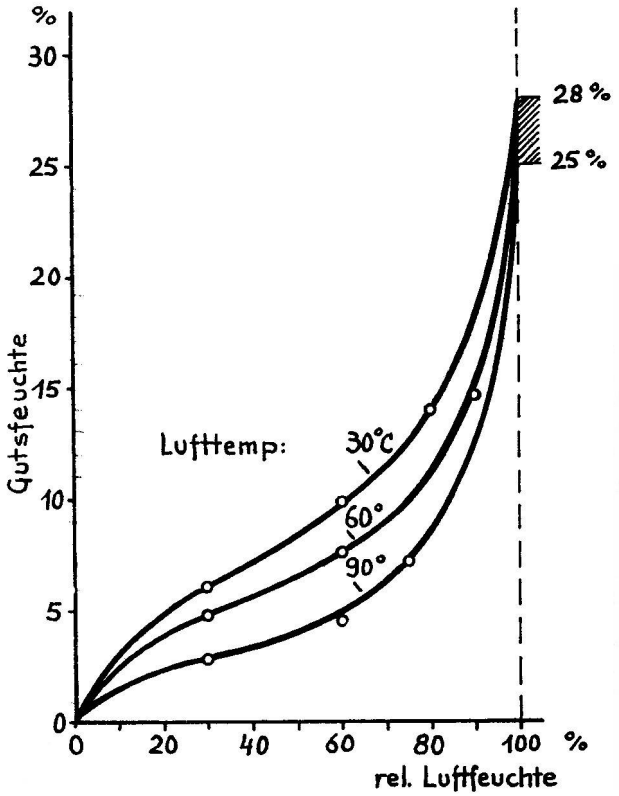


Abbildung 3.3: Desorptionskurven von Flachsgarn aus Satlow 1951, S. 626.

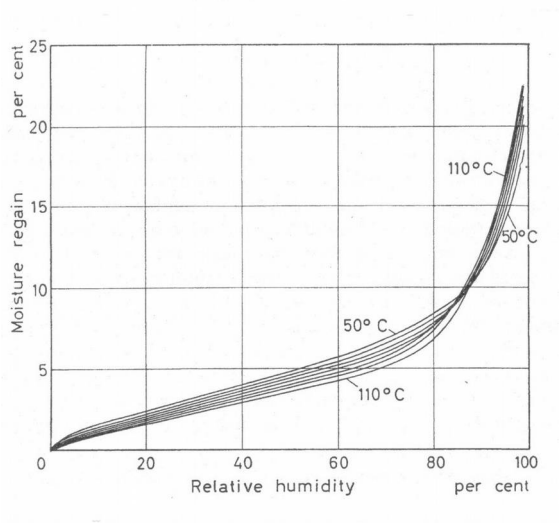


Abbildung 3.4: Auswirkung der Temperatur (10—50 °C) auf die Sorptionsisothermen von Baumwolle aus Urquhart 1960, S. 19.

Das Binden von Wassermolekülen führt zu einem Aufweiten der Celluloseketten und dadurch zu einem Volumenzuwachs, hauptsächlich in der Breite der länglich aufgebauten Elementarfasern.[123] Die Längsquellung ist so gering, dass sie in den meisten Betrachtung nicht berücksichtigt wird. Diese Anisotropie setzt sich auch in höheren Strukturebenen von der Elementarfaser bis zum Garn fort. Grund für das anisotropische Quellverhalten sind die parallelisierten, länglich angeordneten Fibrillen in der Elementarfaser von Flachs. Die Wassermoleküle dringen zwischen die parallel angeordneten Celluloseketten ein und weiten das Gefüge in die Breite auf. Die meiste Quellung findet in der Sekundärwand der Zelle statt (S_2-Schicht, s. Abb. 3.1, S. 36), weil dort der Anteil an Cellulose am höchsten ist. Die dadurch entstehenden Dimensionsänderungen der Faser verlaufen nicht linear zur Veränderung der Umgebungsfeuchte, aber in Abhängigkeit ihrer Materialfeuchte, wie anhand Abb. 3.5 nachvollziehbar ist, wenn man die Sorptionsisotherme berücksichtigt (Abb. 3.13, S. 78). Das Beispiel zeigt das Verhalten von Baumwollfasern. Aber auch für Flachsfasern wurde gezeigt, dass sich die Dimensionsänderungen linear zur Gleichgewichtsfeuchte verändern (Abb. 3.6).[124]

123 Klemm et al. 1998, S. 49.
124 Chakravarty 1971, S. 320.

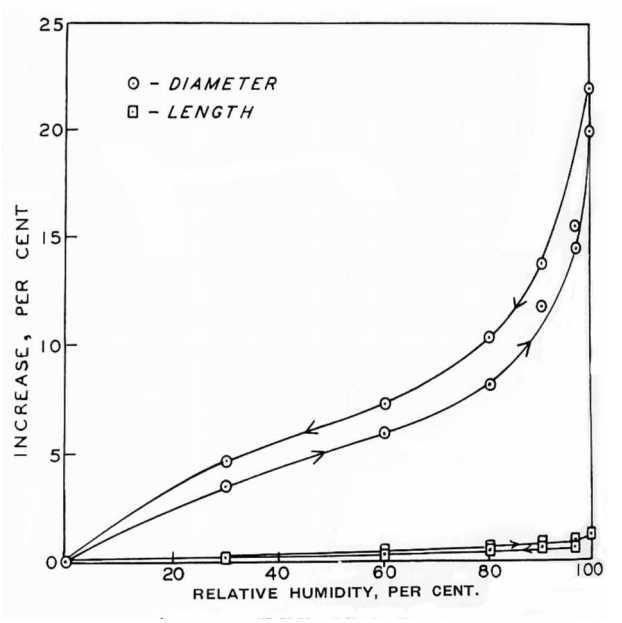


Abbildung 3.5: Dimensionsänderung der Faserdicke und -länge in Abhängigkeit zur rel. Feuchte am Beispiel Baumwolle. Aus Collins 1939, S. P46.

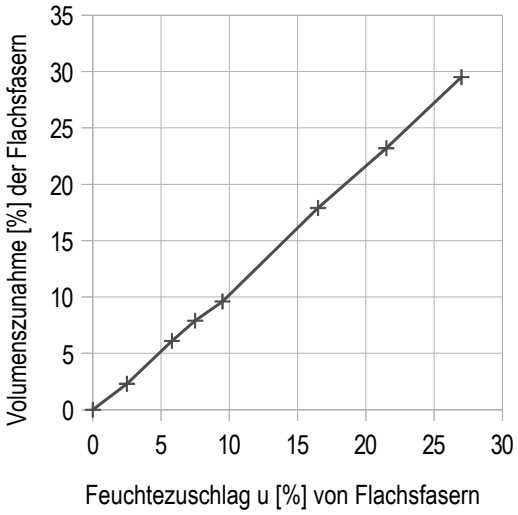


Abbildung 3.6: Volumenszunahme von Flachsfasern in Abhängigkeit zum Feuchtezuschlag. Werte aus Chakravarty 1971, S. 320.

3.2 Aufbau der Elementarfaser des Flachses

3.2.1 Cellulose

Cellulose ist der Hauptbestandteil der Zellwand von höheren Pflanzen, so auch von Flachs. Cellulose hat durch ihren regelmäßigen Aufbau die Tendenz, hoch geordnete Strukturen zu bilden. Die systematische Beschreibung ihrer komplexen Struktur und ihrer Bindung von Wassermolekülen, wird im Folgenden anhand der von Klemm et al. beschriebenen, drei strukturellen Ebenen vorgenommen:[125]

125 Klemm et al. 1998, S. 9.

1. Die molekulare Ebene, die das einzelne Makromolekül beschreibt.
2. Die supramolekulare Ebene, welche die Anordnung der Makromoleküle zueinander umfasst.
3. Die morphologische Ebene, welche die Architektur der bereits relativ komplexen strukturellen Einheiten sowie das dazugehörige Porensystem beschreibt.

Molekulare Ebene

Auf molekularer Ebene ist Cellulose ein unverzweigtes Homopolymer, welches in langen Ketten vorliegt. Die Wiederholungseinheit ist das Disaccharid Cellobiose (Abb. 3.7, S. 46). Cellobiose setzt sich aus zwei Anhydroglycoseeinheiten (Glucoseringe) zusammen, die um 180° gegeneinander verdreht sind und untereinander β-glykosidisch 1,4-verknüpft sind. Die so gebildete Cellulose besteht aus unterschiedlich langen Molekülketten. Die Anzahl der Anhydroglycoseeinheiten, also die Kettenlänge, wird deshalb als Durchschnittswert angegeben, dem durchschnittlichen Polymerisationsgrad (DP).[126] Dieser schwankt im Falle von nicht gealtertem Flachs zwischen 1 330 und 8 000 (siehe Tabelle 3.1).[127] Tabelle 3.1 fasst einige publizierte Werte für Cellulose aus Flachs zusammen. Für die Bestimmung des DP existieren verschiedene Methoden. Eine weit verbreitete Methode ist das Lösen der Cellulose und die Bestimmung der Viskosität dieser Lösung. Die Viskosität wird als Grenzviskositätszahl (GVZ) in ml/g angegeben. Daraus lässt sich rechnerisch auf verschiedenen Wegen der DP ermitteln. Die Werte des DP bzw. der GVZ sind nur vergleichbar, wenn sowohl die Bestimmungsmethode als auch der Rechenweg zur Berechnung des DP identisch sind, was nur auf wenige Ergebnisse zutrifft.[128] Die Werte in der Tabelle sind so detailliert angegeben, wie es sich aus den jeweiligen Publikationen entnehmen lies. Die Werte, die von Staudinger/Feuerstein 1936 gemessen wurden, sind häufig in späteren Publikationen zitiert worden.[129]

126 Klemm et al. 1998, S. 9—12.
127 Als Bestandteil der Zellwand anderer Pflanzen ist die Schwankung des DP von Cellulose weiter gefasst und liegt für Holzzellstoffe zwischen 300 und 1 700, für Baumwoll- und andere Pflanzenfasern zwischen 800 und 10 000 betragen.Klemm et al. 2005, S. 3425.
128 NORM DIN 54270-1. Eine detaillierte Diskussion hierzu findet in Kapitel 5.2.2, Kapillarviskosimetrie, S. 176f statt.
129 Koch 1955, S. 338; Ullmanns Encyklopädie, s. v. Bastfasern; Ward 1946, S. 9; Harris 1954, S. 58; Batra 2007, S. 489.

Tabelle 3.1: Publizierte Werte des Durchschnittlichen Polymerisationsgrades (DP) bzw. der Grenzviskositätszahl (GVZ) von Cellulose aus Flachs unterschiedlicher Herkunft, Verarbeitung und Alter.

*Die Angaben sind jeweils so detailliert, wie es sich den jeweiligen Publikationen entnehmen lies. DP = Durchschnittlicher Polymerisationsgrad, GVZ = Grenzviskositätszahl, KV = Kapillarviskosimetrie, LM = Lösungsmittel, CuEn = Kupferethylendiamin, Cuoxam = Kupfertetraminhydroxyd , Cadoxen = Cadmium-Komplex, $EWNN_{mod(NaCl)}$ = Eisen(III)-Weinsäure-Natriumkomplex gelöst in Natronlauge, * Alle Gewebe wurden vor der Bestimmung des DP 1 Stunde in 1%iger NaOH Lösung gekocht.*

Ausgangsmaterial	DP	GVZ	Bestimmungsmethode	Quelle
Badischer Flachs	2420	-	Viskosimetrisch, LM: Cuoxam	Staudinger/Feuerstein 1936, S. 83
Sorauer Flachs	2190	-		
Belgischer Flachs	2390	-		
Flachs	8000	-	KV, Nitrierung, LM: Aceton	Schulz/Marx 1954, S. 80
Liberianischer Flachs roh, neu	3160	2107[130]	KV (25 °C), LM: CuEn; DP=GVZ · 1,5	Selli et al. 1998
Flachs gebleicht	2280	1520[131]		
Flachsgewebe neu	2650, 2250, 2000, 2050	-	KV (25 °C), LM: CuEn	Seves et al. 2000
Flachs neu, unbehandelt	-	1707	KV (20 °C), LM: $EWNN_{mod(NaCl)}$	Backes 2005, S. 138[132]
Flachs neu, gewaschen	-	1373		
Flachs	4700	-	Ubk.	Batra 2007, S. 489

130 Von Selli et al. wurde nur der DP mit seinem Rechenweg angegeben. Anhand dieses Rechenweges wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit die GVZ aus dem DP berechnet: DP / 1,5.

131 Siehe Fußnote 130.

132 Von Backes wurden nur Werten der spezifischen und der relativen Viskosität berechnet. Daraus wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit die GVZ errechnet. Siehe Anhang A, Tab. A.1, S. 294. Zur Definition der spezifischen und relativen Viskosität siehe Kapitel 5.2.2, Kapillarviskosimetrie, S. 177.

Ausgangsmaterial	DP	GVZ	Bestimmungsmethode	Quelle
Neues, handgewebtes Flachsgewebe,		-	Viskosimetrisch, LM: Cuen	Kleinert 1967, S. 78
Sonnengebleicht*	2000, 1960, 1850			
Neues, chemisch gebleichtes Flachsgewebe*	1590, 1480, 1430, 1400, 1330	-		
Haushaltsleinengewebe, nach 150—200		-		
Nutzungs- und Waschzyklen, die deutliche				
Festigkeitsverluste zeigen*	675, 560, 520, 475, 465			
Leinengewebe aus Ägyptischen Grabfunden*	230 (3500 Jahre alt)	-		
	225 (4000 Jahre alt)			
Flachs frisch geerntet	-	1900	KV, LM: Cadoxen	Stoll/Fengel 1982
modernes Leinen halbgebleicht	-	908		
modernes Leinen weißgebleicht	-	811		
Ägyptisches Leinen, 2800 Jahre alt	-	139		
Ägyptisches Leinen, 4000 Jahre alt	-	103		
50 Ägyptische Textilfunde im Alter von 1000-		-	KV, LM: 1. Cadoxen, 2. Nitrierung und	Stoll/Fengel 1988
4500 Jahren	209—1500		Aceton/Butylacetat	

Die drei Hydroxygruppen (OH) und der Ringsauerstoff jeder Anhydroglycoseeinheit, sowie der Sauerstoff (O) der β-glycosidischen Verbindung ermöglichen die Bildung von Wasserstoffbrückenbindungen innerhalb einer Cellulosekette (intramolekular) und zwischen zwei benachbarten Molekülketten (intermolekular). Innerhalb einer Cellulosekette werden intramolekulare Wasserstoffbrückenbindungen zwischen der OH-Gruppe am C-3 Atom und dem Ringsauerstoffatom O-5 ausgebildet. Zusätzlich wird in der Celluloseforschung eine Verbindung zwischen den jeweiligen OH-Gruppen an den Atomen C-6 und C-2 vermutet. Diese Wasserstoffbrückenbindungen sind als blaue Linie in Abb. 3.2 dargestellt.[133] Die intramolekularen Wasserstoffbrückenbindungen stabilisieren die glykosidische Bindung zwischen den einzelnen Anhydroglycoseeinheiten und verhindern ihre freie Drehbarkeit. Dadurch bewirken sie eine lineare Versteifung der langen Kette. Die Steifigkeit der Kette ermöglicht eine sehr geregelte Anordnung der Celluloseketten zueinander wodurch kristalline Bereiche gebildet und fibrilläre Strukturen entstehen. Die Schwächung oder Trennung dieser intramolekularen Wasserstoffbrückenbindungen destabilisiert die Celluloseketten.[134]

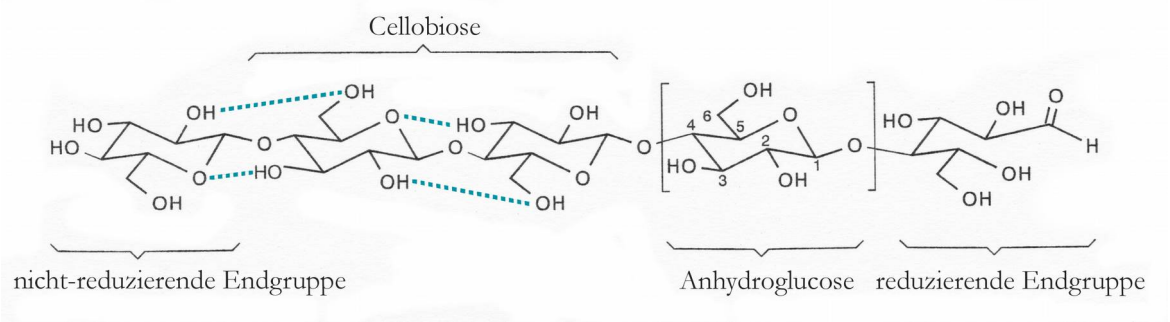


Abbildung 3.7: Cellulosemolekül mit blau eingezeichneten intramolekularen Wasserstoffbrückenbindungen. Die eingezeichneten Zahlen lokalisieren die C-Atome einer Anhydroglucose. Verändert aus Klemm *et al. 1998, S. 10.*

Supramolekulare Ebene

Intermolekulare Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den einzelnen Molekülketten sind für die supramolekulare Struktur verantwortlich. Am häufigsten entstehen sie zwischen der OH-Gruppe am C-6 Atom und dem Sauerstoff des C-3 Atoms einer benachbarten Kette. Die OH-Gruppe am C-6 Atom ragt aus der Ebene des Glucoserings heraus, wodurch sie für Reaktionen mit benachbarten Molekülketten im Besonderen zur Verfügung steht. Intermolekulare Wasserstoffbrückenbindungen führen dazu, dass sich mehrere Celluloseketten dicht nebeneinander legen, sodass hochgeordnete Kristallite entstehen, die Micellen genannt werden.[135]

133 Krässig 1993, S. 9.
134 Klemm et al. 1998, S. 14.
135 Klemm et al. 1998, S. 14—15.

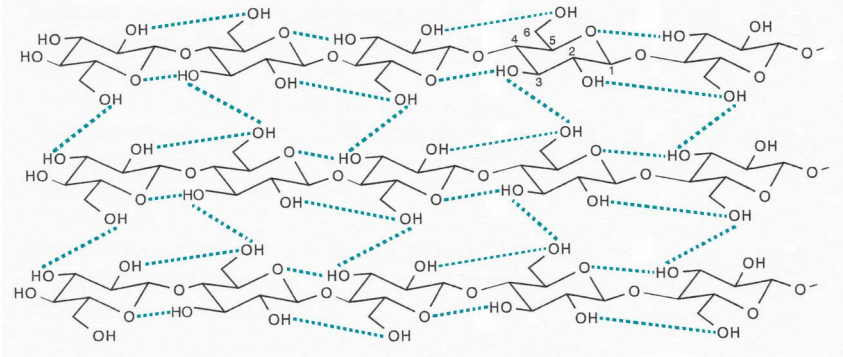


Abbildung 3.8: Cellulosemolekül mit blau eingezeichneten intra- und intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen. Molekülkette nach Klemm et al. 1998, S. 10.

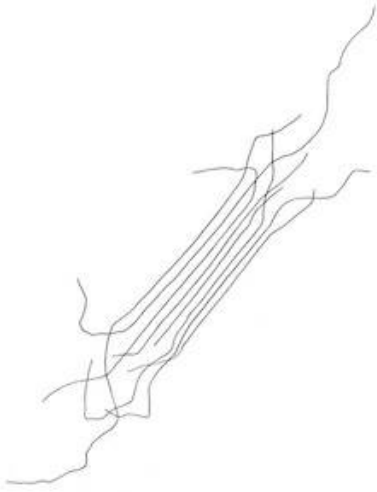


Abbildung 3.9: Fransenmicelle in Anlehnung an Kast et al. 1955, S. 192.

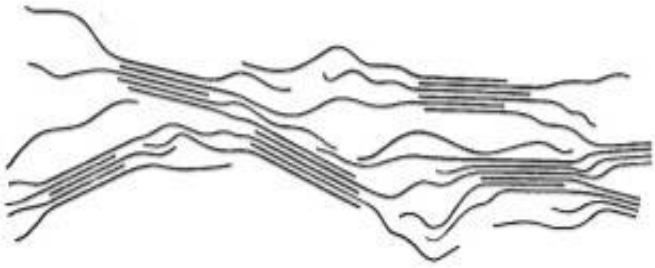


Abbildung 3.10: Fransen-Micellen-Modell.
Die Celluloseketten durchlaufen kristalline und amorphe Bereiche innerhalb einer Mikrofibrille. Aus Treiber 1957, S. 12.

Aus den Micellen ragen unterschiedlich lange Enden der beteiligten Celluloseketten heraus, welche auch als Fransen bezeichnet werden (Abb. 3.9). Daraus hat sich die Bezeichnung des Fransen-Micellen-Modells entwickelt. Dieses zwei-Phasen-Modell (Abb. 3.10) beschreibt sowohl kristalline (Micellen) als auch amorphe Bereiche, die weniger stark geordnet sind. Dabei durchlaufen die Celluloseketten aufgrund ihrer Länge sowohl kristalline als auch amorphe Bereiche. Die Micellen variieren in ihrer Größe. Die micellaren bzw. kristallinen Bereiche sind derart stabil, dass ein Eindringen von Wassermolekülen dort nicht möglich ist. Die Aufnahme von Wassermolekülen kann nur in den amorphen Bereichen und am Rand der kristallinen Bereiche erfolgen, also intermicellar.[136]

Wassermoleküle können nicht am Glucosering selbst gebunden werden, sondern an den drei Hydroxygruppen jeder Anhydroglycoseeinheit. Die Bindung von Wassermolekülen steht da-

136 Hearle 1960b, S. 12—13.

durch in direkter Konkurrenz zur Bildung der zuvor genannten intra- und intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen, die den Aufbau der supramolekularen Struktur innerhalb einer Flachsfaser bestimmt. Daher beeinflusst der strukturelle Aufbau der Cellulose unmittelbar die Bindung von Wassermolekülen.
Cellulose, die vollständig frei von Wassermolekülen ist, bildet die maximal mögliche Anzahl an intra- und intermolekularen Wasserstoffbrückenbindungen. Die Abwesenheit von Wassermolekülen führt so zu einer extremen Sprödigkeit der Cellulose.[137] Es handelt sich dabei allerdings um einen Zustand, der selbst unter Laborbedingungen nicht erreicht wird. Auch nach vollständiger Trocknung ist in Cellulose immer noch ein Anteil von 0,5 % Feuchte vorhanden.[138] Demnach ist auch im alltäglichen Kontext von Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen von Leinwänden nicht mit einem vollständig ausgetrockneten Material zu rechnen. Wassermoleküle, die sich in einer einfachen Lage (Monolayer) direkt an den zugänglichen Celluloseketten anlagern sind chemisch sehr fest an die Celluloseketten gebunden (Chemisorption) und lassen sich durch gängige Trocknungsvorgänge nicht entfernen. Auch sind sie unter normalen Umgebungsbedingungen nicht an Sorptions- und Desorptionsprozessen beteiligt. Die Angaben, bis zu welchem Bereich der Sorptionsisotherme die Wassermoleküle im Monolayer gebunden werden, variieren zwischen 10—12 %rF[139] und 30 %rF[140] bzw. bis zu einer Gleichgewichtsfeuchte von 4 %[141] (siehe auch Abb. 3.2, S. 39). In diesem Bereich ist das Material verhältnismäßig trocken und hat eine große Tendenz Wassermoleküle zu binden, weshalb die Sorptionsisotherme in diesem Bereich schnell ansteigt.

Weil Wassermoleküle nur in die amorphen Bereiche eindringen können, bestimmt das Verhältnis zwischen kristallinen und amorphen Bereichen die Menge der aufgenommenen Feuchte (siehe Abb. 3.11). Der relative Anteil der Micellen wird als Kristallinitätsindex angegeben und variiert je nach Pflanzenart und Verarbeitung des Fasermaterials.[142] Allerdings ist eine strenge Trennung zwischen amorphen und kristallinen Bereichen eine theoretische Modellvorstellung. In Realität sind die Grenzen fließend und nicht immer eindeutig, sodass Zahlenwerte zu den Anteilen kristalliner Bereiche als eine Annäherung verstanden werden müssen.[143] Konkretere Beschreibungen dieser Übergänge sind in den genannten Quellen nicht gegeben.
Ganz allgemein wird für native Cellulose ein Anteil von 70 % kristalliner Bereiche angenommen.[144] Für Flachs variieren die Angaben. Weil die Ergebnisse stark von der verwendeten Bestimmungsmethode abhängen, ist ein Vergleich der publizierten Daten nicht in jedem Fall

137 Hermans 1949, S. 193.
138 Corte 1980, S. 57.
139 Hermans 1949, S. 189.
140 Hartley et al. 1992, S. 93.
141 Corte 1980, S. 59. Der Publikation ist nicht zu entnehmen, ob es sich dabei um den Feuchtezuschlag oder um den Feuchteanteil handelt.
142 Klemm et al. 1998, S. 15.
143 Hermans 1949, S. 311.
144 Fan et al. 1987, S. 19.

möglich.[145] Tabelle 3.2 (S. 50) fasst einige publizierte Werte für Flachs zusammen. Diese allgemeinen Werte zum prozentualen Anteil der kristallinen Bereich werden von Garside/Wyeth noch um einen weiteren Schritt präzisiert. Sie haben eine Methode entwickelt, innerhalb der allgemeinen Kristallinität zwei Bereiche zu quantifizieren: solche Bereiche die innerhalb einer Vorzugsrichtung orientiert sind, d. h. in parallel liegenden Fibrillen z. B. in der Sekundärwand der Zelle und solche kristallinen Bereiche, die nicht orientiert sind, wie in der Primärwand der Zelle (siehe Abb. 3.1, S. 36). Für Flachs haben sie ermittelt, dass innerhalb der gesamten kristallinen Bereiche 70 % in einer Vorzugsrichtung angeordnet sind.[146] Innerhalb der Konservierungswissenschaft hat sich die Bestimmung des Kristallinitätsindexes für Cellulose bisher nicht etabliert.

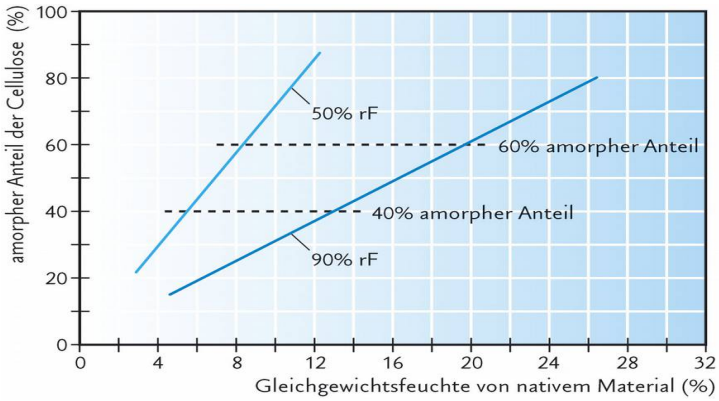


Abbildung 3.11: Aufnahme von Feuchte von nativen Faserstoffen in Abhängigkeit vom Verhältnis von kristallinen und amorphen Bereichen der Cellulose. Brückle 2015b, S. 95.

Im unregelmäßigen Wechsel zwischen kristallinen und amorphen Bereichen ordnen sich die Celluloseketten in fibrillären Strukturen an (siehe auch Abb. 3.1, S. 36). Die Größe der Micellen und deren Verteilung können über den Anteil der Kristallinität hinaus auf die Zugänglichkeit von Cellulose gegenüber Wassermolekülen Einfluss nehmen, weil sich Wassermoleküle nicht nur in den amorphen Bereichen selbst anlagern, sondern auch an der Oberfläche der Micellen.[147]

Die kleinste fibrilläre Struktur ist die Mikrofibrille. Die Mikrofibrillen haben keine fest definierte Größe, sondern variieren in ihrem Durchmesser und in ihrer Länge. Die Angaben zu ihrem Durchmesser variieren zwischen 3 und 30 nm.[148] Ihre Länge erreicht mehrere 100 nm.[149] Sie können als komplexeste Einheit der supramolekularen Ebene und gleichzeitig als kleinster Baustein der morphologischen Ebene betrachtet werden. Dieses Modell löst die in älterer Literatur genannte Elementarfibrille ab, die als kleinste strukturelle Einheit im Faseraufbau galt.[150]

145 Park et al. 2010.
146 Garside/Wyeth 2003, S. 175.
147 Krässig, S. 168 und S. 171.
148 Klemm et al. 1998, S. 23; Klemm et al. 2005, S. 3426.
149 Klemm et al. 2005, S. 3426.
150 Klemm et al. 1998, S. 22—23.

Tabelle 3.2: Publizierte Werte für die Kristallinität von Flachs.

Material	**Anteil kristalliner Bereiche [%] (Kristallinitäts-index)[151]**	**Bestimmungs-methode**	**Quelle**
Flachs	70 %	Ohne Angabe	Batra 2007, S. 484
Flachs	90 %	Ohne Angabe	Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 11
Flachs	70 %	ATR-FTIR	Garside/Wyeth 2003, S. 175
Flachs	67 % (0,67)	Röntgendiffraktion	Ioelovitch 1992, S. 112
Flachs	66±3 %	Ohne Angabe	Ganster/Fink 1999, S. V/137
Flachs gebleicht	67 %		
Neues Flachsgewebe	100 % (1,00)	ATR-FTIR	Garside/Wyeth 2003, S. 175
Historisches Flachsgewebe 16. Jh.	100 % (1,00)		
Gealtertes Flachsgewebe bei 190 °C für 43 h	40 % (0,40)		Garside/Wyeth 2004, S. 254
Zu dem gealterten zugehöriges neues Flachsgewebe	61 % (0,61)		
Flachsbildträger Gemälde 1. Hälfte 19. Jh.	70 % (0,7022)	FTIR	Kavkler et al. 2011, S. 578
Flachsbildträger Gemälde Ende 17. Jh.	83 % (0,8308)		
Flachsbildträger Gemälde 1582-1584	67 % (0,6724)		
Flachsbildträger Gemälde 17. Jh.	59 % (0,5894)		
Flachsbildträger Gemälde 1821	86 % (0,8639)		

In den amorphen Bereichen innerhalb der Mikrofibrillen als auch in den Zwischenräumen der Makrofibrillen können sich die Wassermoleküle in mehreren Schichten übereinander lagern. Die Angaben zur Anzahl der Schichten variieren von zwei bis zu sieben[152] bzw. zehn[153] Schichten. Man spricht von multimolekularem Wasser. Multimolekulares Wasser ist in einer regelmäßigen Struktur angeordnet, es verhält sich nicht wie flüssiges Wasser. Dennoch ist es bis zu einem gewissen Grad mobil aber noch vergleichsweise fest gebunden.[154] Ab wann es zur Bildung von multimolekularen Schichten von Wassermolekülen kommt, variiert bei unterschiedlichen Autoren zwischen 10 %rF[155] und 30 %rF.[156] Auch das obere Ende ist nicht eindeutig definiert und wird bei 55 %rF[157] angegeben. In der Sorptionsisotherme ist dieser Bereich durch einen langsameren Anstieg und annähernd linearen Verlauf erkennbar (s. auch Abb. 3.2, S. 39).

151 Wurde die Kristallinität in den jeweiligen Publikationen als Kristallinitätsindex zwischen 0 und 1 angegeben, wurde er für eine einfachere Vergleichbarkeit in der Tabelle zusätzlich in % angegeben.
152 Klemm et al. 1998, S. 48.
153 Brückle 2015b, S. 99.
154 Hartley et al. 1992, S. 84—85.
155 Hermans 1949, S. 189.
156 Hartley et al. 1992, S. 93.
157 Hartley et al. 1992, S. 93.

Werden Wassermoleküle gebunden, kann es zu einem Bruch bereits bestehender intra- oder intermolekularer Wasserstoffbrückenbindungen kommen. Jeder Bruch erlaubt ein aneinander vorbei gleiten benachbarter Regionen, enger heranrücken oder andere neue Konfigurationen innerhalb der Cellulosestruktur. Es finden also aufgrund von Sorption bestimmte Neuordnungen statt. Gleiches gilt für die Trocknung. In der Regel sind daher Wechselwirkungen von Cellulose mit Wassermolekülen nicht vollständig reversibel und es können deutliche Veränderungen in der physikalischen Struktur auftreten, die wiederum neue Voraussetzungen für das Binden von Wassermolekülen schaffen. Vor allem trifft dies auf starke Trocknungsvorgänge zu.[158] Wird ein Fasermaterial hohen Temperaturen ausgesetzt, kann sich dadurch sein Aufnahmevermögen für Feuchte irreversibel verändern. Nach Scheithauer beeinflusst eine Trocknung des Materials bei 80 °C die Sorptionsfähigkeit noch nicht, die zur vollständigen Trocknung von Fasermaterialien empfohlene Temperatur von 105 °C jedoch durchaus.[159] Ob sich das Sorptionsverhalten ändert, hängt neben der Höhe der Temperatur davon ab, ob die Erwärmung unter Anwesenheit oder Abwesenheit von Feuchte stattfindet. Bei hohen Temperaturen findet eine erhöhte Molekülbewegung statt, die sowohl das Aufbrechen bestehender, als auch Entstehen neuer chemischer Bindungen zwischen den Celluloseketten begünstigt. In Abwesenheit von Feuchte brechen bestehende Verbindungen auf, bei gleichzeitiger starker Tendenz, neue Bindungen einzugehen. So kommt es zu einer stärkeren Vernetzung der benachbarten Celluloseketten, der Erhöhung der Kristallinität, wodurch sich die Bindungsmöglichkeit von Wassermolekülen reduziert. Ist jedoch bei der Erwärmung die Atmosphäre mit Wassermolekülen gesättigt, werden die aufbrechenden Bindungen sofort mit Wassermolekülen belegt, was sich in einer erhöhten Aufnahme von Feuchte bemerkbar macht. Es wird vermutet, dass es einen Zustand zwischen diesen beiden Extremen gibt, der keine Veränderung des Materials bezüglich der anschließenden Aufnahmefähigkeit von Feuchte erzeugt.[160] Dieser Punkt ist für Flachs jedoch nicht definiert. Zusammengefasst lässt sich sagen, dass das Fasermaterial nach einer „trockenen Erhitzung“ weniger Feuchte als zuvor binden kann, während eine vergleichbare Erwärmung in sehr feuchter Umgebung eine Erhöhung der Feuchteaufnahme zur Folge hat. Einer Empfehlung von Tímár-Balázsy/Eastop zufolge sollten Gewebe, vor allem bereits degradierte, während einer Trocknung nicht Umgebungsfeuchten unterhalb 50 %rF ausgesetzt werden.[161]

Morphologische Ebene

Mehrere Mikrofibrillen bilden, gebündelt und ummantelt von Hemicellulose und Lignin, die nächst größere morphologische Einheit, die Makrofibrillen, deren Durchmesser zwischen 10—50 nm liegen kann, je nach pflanzlichem Ursprung der Cellulose. Ihre Länge erreicht den Be-

158 Klemm et al. 1998, S. 44—45.
159 Scheithauer 1941, S. 72, die vollständigen Werte seiner Trocknungsversuche sind im Anhang A, Tab. A.8, S. 297 wiedergegeben.
160 Urquhart 1960, S. 17—18; 23—24; Hermans 1949, S. 190; Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 286.
161 Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 286.

reich der Mikrometer.[162] Mikro- und Makrofibrillen bilden die Konstruktionselemente der Zellwände einer Zelle, die als Elementarfaser bezeichnet wird. Dabei legen sich die Makrofibrillen, in mehreren Lagen in unterschiedlicher Orientierung um die Achse der Elementarfaser. Die Orientierung der Makrofibrillen ist charakteristisch für die jeweilige Pflanze und wird als Steigungswinkel zwischen der Längsachse der Zelle und der Makrofibrille gemessen (siehe auch Abb. 3.1, S. 36).[163]

Die Zellwand der Elementarfaser der Flachspflanze besteht aus drei Schichten (Abb. 3.1). In der Primärwand liegen relativ wenige Makrofibrillen eingebettet in Hemicellulose regellos nebeneinander. Der Anteil der Cellulosefibrillen beträgt meist nur um 10 %. Die Sekundärwand besteht aus zwei Schichten und setzt sich zu etwa 90 % aus Cellulosefibrillen zusammen. In beiden Schichten der Sekundärwand sind die Makrofibrillen in einer bestimmten Richtung sehr dicht und parallel zueinander angeordnet und weisen einen für die Ursprungspflanze spezifischen Steigungswinkel auf. In der Flachsfaser ist die äußere Schicht der Sekundärwand (S_1) mit 10 % der Gesamtwandstärke relativ dünn. Ihre Fibrillen sind linksgewunden (S) mit einem Steigungswinkel von 10°. Die S_2 Schicht trägt mit 85 % einen hohen Anteil der Gesamtwandstärke. Ihre Fibrillen sind rechtsgewunden (Z) mit einem Steigungswinkel von 5°. Den inneren Abschluss bildet die sehr dünne Tertiärwand, die auch als S_3 Schicht bezeichnet werden kann. Im Zentrum der Elementarfaser liegt das Lumen. Zusammengehalten werden die Elementarfasern von der ganz außen angeordneten Mittellamelle, welche reich an Hemicellulose, Pektin und Lignin ist. Sie verbindet mehrere Elementarfasern zu Faserbündeln, die in der äußeren Schicht des Stängels der Flachspflanze liegen. Dort fungieren sie als Stützgewebe.[164]

Die gegensätzliche Orientierung der Fibrillen in der S_1 Schicht der Sekundärwand der Zelle soll dafür verantwortlich sein, dass sich Flachs- und Hanffasern in unterschiedliche Richtungen drehen, sobald sie befeuchtet werden. Dieses Merkmal wird in älterer Fachliteratur zuweilen als Unterscheidungsmerkmal beider Fasern verwendet.[165] Sowohl Garside/Wyeth[166] als auch Untersuchungen an der HfBK Dresden[167] kommen zu dem Ergebnis, dass diesbezüglich keine Gesetzmäßigkeit vorliegt.

Zwischenräume, Poren und Hohlräume

In der fibrillären Anordnung der Celluloseketten in den Zellwänden der Elementarfaser existieren auf allen strukturellen Ebenen, also der molekularen, supramolekularen und morphologischen Ebene, Zwischenräume, die als Kapillare, Poren und Hohlräume bezeichnet werden. Sie liegen in unterschiedlicher Form, Größe und Verteilung vor und nehmen Einfluss auf die Art

162 Klemm et al. 1998, S. 23—24.
163 Kölln 2004, S. 12.
164 Wülfert, S. 255—257; Kölln 2004, S. 12—13.
165 Schilling 1930a, S. 27.
166 Garside/Wyeth 2006, S. 206.
167 Hofmann 2002.

und Menge der aufgenommenen Wassermoleküle.[168] Diese Zwischenräume können miteinander verbunden sein und bilden ein dreidimensionales Netzwerk.[169] Die Gesamtheit der Poren und Hohlräume kann durch das Porenvolumen, der durchschnittlichen Porengröße und der inneren Oberfläche charakterisiert werden. Darüber hinaus können Informationen zur Größenverteilung und der Porenform aufschlussreich sein.[170] Krässig geht allgemein für native Cellulose von einem Volumenanteil von 3—4 % aus.[171] Genauere Angaben zu einzelnen Faserstoffen sind in den gesichteten Quellen nicht publiziert. Krässig gibt lediglich eine Spezifizierung für Baumwolle mit einer inneren Oberfläche von 140—160 m^2/g. Für absolut amorphe Cellulose wird ein Wert von 400 m^2/g angegeben.[172] Die Größenordnungen der Zwischenräume werden zwischen 1 nm (intermicellare Spalten) bis mehr als 10 nm (interfibrillär) im Durchmesser angegeben.[173]

Im oberen Drittel der Sorptionsisotherme kommen neben den gebundenen Wassermolekülen im Mono- und Multilayer auch weniger fest gebundene Wassermoleküle vor, die sich freier bewegen können und sich in Clustern unterschiedlicher Größe zusammenlagern. Die Eigenschaften dieser Wassercluster werden mit jenen flüssigen Wassers verglichen. Ab einer rF von 55 %[174] bzw. knapp über 60 %[175] können Wassermoleküle in dieser Form in den Zwischenräumen vorhanden sein.[176]
Zusätzlich kann es im oberen Drittel der Sorptionsisotherme zur Kapillarkondensation in den Zwischenräumen kommen.[177] Die Form der Isotherme ist in diesem Bereich eng mit dem Charakter der Zwischenräume des Materials verbunden und verläuft wieder deutlich steiler (s. Abb. 3.2, S. 39). Das Kapillar- oder Porenwasser wird durch seine Oberflächenspannung in den Hohlräumen und Poren gehalten.
Von Kapillarporen spricht man, wenn diese für flüssiges Wasser zugänglich sind und eine wasserbenetzbare Porenwandung vorliegt. Kapillaren bauen einen sogenannten Kapillardruck auf, d. h. in Kapillaren ist der Druck höher als in der Umgebung. Dieser Effekt ist um so größer, je kleiner der Durchmesser der Kapillare ist. Sind Kapillaren unterschiedlichen Durchmessers miteinander verbunden, entziehen die kleineren so lange den größeren Wasser, bis alle kleineren Poren eines bestimmten Durchmessers gesättigt sind. Die Porendurchmesser, welche von diesem Mechanismus betroffen sind liegen zwischen etwa 0,1 mm und 100 nm. Im Gleichgewichtszustand sind alle Kapillarporen bis zu einem bestimmten Durchmesser wassergefüllt und alle weiteren Poren (von den Wassermolekülen im Mono- und Multilayer abgese-

168 Klemm et al. 1998, S. 25.
169 Krässig 1993, S. 39.
170 Klemm et al. 1998, S. 26—27.
171 Krässig 1993, S. 39.
172 Krässig 1993, S. 207.
173 Batra 2007, S. 481 und Treiber 1955, S. 381—382.
174 Hartley et al. 1992, S. 93.
175 Lück 1964, S. 53; Hearle 1960a, S. 179.
176 Hartley et al. 1992, S. 94—95.
177 Hearle 1960a, S. 179.

hen) leer. Durch die Erhöhung des Drucks in den Kapillaren, verändert sich dort auch die relative Feuchte und der damit verbundene Taupunkt. Durch die Kondensation von Wasser füllen sich die Kapillare mit Wasser. Es besteht also ein Zusammenhang zwischen der relativen Feuchte und dem Kapillardurchmesser, bei welchem Kapillare mit Wasser gefüllt sind.[178] Die Beziehung zwischen relativer Luftfeuchte und dem Radius der größten noch mit Wasser gefüllten Pore ist in Tab. 3.3 dargestellt.

Tabelle 3.3: Füllung von Poren mit Wassermolekülen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser und von der rF. Daten bei 20 °C aus Kupfer 1997, S. 12; Daten bei 22 °C aus Hearle 1960a, S. 179.

Durchmesser [nm]	Relative Luftfeuchte [%]	Temperatur [°C]	Art der Porenfüllung, Stärke der Wasserbindung
1,0	10	20	Monomolekulare Schicht
1,2	16	20	
1,4	20	20	Multimolekulare Schicht
1,6	30	20	
2,4	40	20	
3,2	50	20	
4,4	60	20	
6,3	70	20	
8	76	20	Kapillarkondensation
10	80	20	
14	85	20	
22	90	20	
44	95	20	
218	99,025	22	
2180	99,901	22	
10860	99,980	22	
15500	99,986	22	
21800	99,990	22	
43200 (43,2 µm)	99,995	22	
218000 (218 µm)	99,999	22	
> 100 µm	100	20	Frei bewegliches Wasser

In der Cellulosechemie geht man davon aus, dass es während der Aufnahme von Wassermolekülen zu einer Vergrößerung des Porenvolumens kommt.[179] Eine Untersuchung aus der Textiltechnik kommt jedoch zu dem Schluss, dass sich die Porosität von Flachsfasern durch Sorption nicht wesentlich ändert.[180]

In der Konservierungswissenschaft wurden Gewebe des textilen Bildträgers bisher nicht bezüglich ihrer Zwischenräume, Poren und Hohlräume charakterisiert. Folglich kann kein Bezug zur Aufnahme von Feuchte hergestellt werden.

178 Klopfer/Homann 2008, S. 362—363.
179 Klemm et al. 1998, S. 26—27.
180 Chakravarty 1971.

Vor dem Hintergrund, dass das gesamte Porenvolumen und die Größenverteilung der Poren sehr sensibel auf Quell- und Schwundmechanismen reagieren, ist dieses Thema durchaus einer näheren Betrachtung wert. Der Übergang zwischen dem Vorhandensein von Wasserdampf und flüssigem Wasser im Fasermaterial ist schwer zu definieren. Offensichtlich ist jedoch, dass sich flüssiges Wasser grundsätzlich unterschiedlich verhält und zu einem starken Anstieg der Gleichgewichtsfeuchte führt.

Für Befeuchtungen im Rahmen von Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen erfordert dieser Bereich besondere Aufmerksamkeit, weil schon kleine Änderungen in der Umgebungsfeuchte signifikante Änderungen in der Materialfeuchte bewirken. In der Papierkonservierung geht man davon aus, dass die Wassermoleküle in diesen hohen Bereichen der rF durch das Aufweiten des fibrillären Gefüges neue Zwischenräume ausbilden. Davon betroffen sind jedoch nur sehr kleine Zwischenräume, die einen geringeren Durchmesser als 1 µm besitzen. Größere Zwischenräume werden erst durch eine direkte Befeuchtung durch flüssiges Wasser gefüllt. Die Gleichgewichtsfeuchte steigt dann auf mehr als 100 % und die maximale Quellung der Fasern wird erreicht.[181]

Wird cellulotisches Material von der vollständigen Tränkung mit Wasser zu schnell getrocknet, kann es zum Kollabieren von Zellen kommen. Dieser Effekt ist ausführlich am Beispiel von Archäologischem Nassholz[182] beschrieben, aber auch auf Textilien[183] übertragen worden. Während einer schnellen Trocknung verdunstet die Feuchte aus dem Gewebe an der Oberfläche. Gleichzeitig migrieren die im Material gebundenen Wassermoleküle durch Kapillarkräfte an die Oberfläche. Die hohe Oberflächenspannung von Wasser erlaubt kein Eindringen von Luft in die sich leerenden Kapillare. Die dabei entstehenden hohen Spannungen können ein Kollabieren der Zelle provozieren. Dieser Effekt trägt dazu bei, dass Celluloseketten stärker vernetzen und die Kristallinität steigt.

Es existieren nur wenig veröffentlichte Daten zu Dimensionsänderung der Elementarfasern. Sofern es den entsprechenden Publikationen nicht eindeutig zu entnehmen ist, ob sich die Daten auf die Elementarfaser oder die technische Faser beziehen, wird der allgemeine Begriff „Faser“ verwendet.
Sommer weist auf Schwierigkeiten in den Messverfahren hin, die zur Ermittlung der Dimensionsänderungen von Fasern infolge der Quellung angewandt werden. Die Messung von z. T. sehr kleinen Dimensionsänderungen erfordert besondere apparative Einrichtungen. Diese Problematik spiegelt sich in der großen Streuung der Quellungswerte wider. Vor allem in Faserlängsrichtung liegen die Werte schon in den Fehlerbereichen der Messverfahren und können folglich nur als Orientierungswert dienen.[184]

181 Brückle 2015b, S. 101—102.
182 Grattan 1987, S. 61—62.
183 Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 285.
184 Sommer 1960, S. 1200—1202 und Kleinhansl 2000c, S. 216—217.

Die Daten für die Längsquellung von Flachsfasern variieren zwischen 0,05 %[185] und 0,2 %[186]. Es ist zu berücksichtigen, dass der höchste Wert von 0,2 % nach einer Quellung der Fasern in Natronlauge gemessen wurde und nicht unbedingt das Quellvermögen aufgrund der Sorption von Wassermolekülen ausdrückt.[187]
Die Angaben zur Breitenquellung der Fasern beziehen sich entweder auf den Durchmesser oder die Querschnittsfläche. Nach Morehead beträgt die Quellung der Querschnittsfläche der Elementarfaser von Flachs (Werg) nach vollständiger Sättigung mit Wasser 47 %.[188] Auch dieser Wert ist nicht auf Wasserdampf bezogen. Er wurde an Dünnschnitten der Elementarfaser (10 µm) gewonnen und stellt dadurch die absolute Obergrenze der Quellfähigkeit dar. Derart hohe Werte können beim Einwirken von Wasserdampf nicht erwartet werden. Die vollständige Quellung von Flachsfasern, ebenfalls in Wasser, wurde mikroskopisch auch von Moore et al. am Querschnitt erfasst und sogar noch höher, mit 64,9 %, beziffert.[189] Welo et al. geben denselben Wert an, dabei geht aus der Publikation nicht exakt hervor, ob der Wert durch eigene Messungen ermittelt wurde.[190] Hoehnel beziffert die „Dickenzunahme" von Lein mit 17,1 %, 29,0 % und 21,1 %, wobei die Dickenzunahme nicht näher definiert ist. Ob die Fasern durch Wasserdampf oder flüssiges Wasser an Volumen zugenommen haben, und ob es sich um Elementarfasern oder technische Fasern handelt, geht aus der Beschreibung nicht hervor.[191]
Die genannten Werte beziehen sich auf die Nassquellung. Die Messung der Dimensionsänderungen aufgrund von Trockenquellung, also durch Eindringen von Wasserdampf, in Abhängigkeit verschiedener Umgebungsfeuchten, steht noch aus. Offensichtlich fehlt es an geeigneten Methoden, diese präzise erfassen zu können.

3.2.2 Begleitsubstanzen

Neben Cellulose sind in der Elementarfaser zusätzlich Hemicellulosen, Pektin und Lignin enthalten. Des Weiteren kommen Fett- und Wachsstoffe und ein geringer Aschegehalt vor.
Die Anteile der jeweiligen Bestandteile der Flachsfasern schwanken je nach Züchtung, Anbau und vor allem in Abhängigkeit ihrer textiltechnischen Verarbeitung. Wie stark die Anteile schwanken können, wird aus Tabelle 3.4 deutlich. Zum Vergleich ist die Zusammensetzung von Baumwollfasern angegeben, die im Gegensatz zu Flachs aus nahezu reiner Cellulose bestehen. Die Auswertung der publizierten Anteile der Begleitsubstanzen hat ergeben, dass viele Autoren die Werte von Turner aus dem Jahr 1949 zitieren (siehe Tabelle 3.4).[192] Es kann an

185 Hoehnel 1905, S. 21.
186 Koch 1955, S. 369.
187 Nodder/Kinkead 1923.
188 Morehead 1947.
189 Moore et al. 1950, S. 626.
190 Welo et al. 1952a, S. 256.
191 Hoehnel 1905, S. 21.
192 Turners Daten wurden zitiert von: Koch 1955, S. 329; Ebert 1993, S. 334; Batra 2007, S. 478; Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 31; Kölln 2004, S. 11.

dieser Stelle nicht bewertet werden, ob diese Daten aus der Perspektive heutiger Technik noch Gültigkeit haben.

Der Cellulosegehalt von geröstetem Flachs schwankt nach den zitierten Autoren zwischen 64,1 % und 71 %.[193] Die Bezeichnung des Ausgangsmaterials für die Tabelle wurde von den jeweiligen Autoren übernommen. Nicht in allen Fällen ist klar beschrieben, welche Art von Flachs jeweils definiert wird, dementsprechend können die Unterschiede nicht bewertet werden.

Tabelle 3.4: Zusammensetzung der Elementarfaser von Flachs [%] nach verschiedenen Autoren. Zum Vergleich die Zusammensetzung von Baumwolle nach Turner 1949.

	Cellulose	**Hemicellulose**	**Pektin**	**Lignin**	**Wasserlösliche Substanzen**	**Fett und Wachs**	**Feuchtigkeit**	**Quelle**
Flachs ungeröstet	56,5	15,4	3,8	2,5	10,5	1,3	10,0	Turner 1949, S. P973
Flachs geröstet	64,1	16,7	1,8	2,0	3,9	1,5	10,0	
Flachs	76,0	k. A.	10,5		k. A.	k. A.	9,0	Harris 1954
Flachs	65,0	16,0	3,0	2,5	Asche: 1,0 Eiweiß: 3,0	1,5	8,0	Haudek/Viti 1981, S. 126
Technische Leinfaser	65,0	16,0	3,0	2,5	k. A.	1,5	8,0	Dambroth/Seehuber 1988, S. 18
Flachs ungeröstet	40,6	11,9	3,9	15,1	k. A.	k. A.	k. A.	Sanio 1995, S. 14
Flachs ungeröstet	63,0	12,0	k. A.	3,0	k. A.	k. A.	k. A.	Hon 1996, S. 3
Flachs geröstet	71,0	21,0	k. A.	2,0	k. A.	k. A.	k. A.	
Flachs	81,0	14,0	4,0	3,0	k. A.	k. A.	k. A.	Mwaikambon/ Ansell 2002
Baumwolle	82,7	5,7	-		1,0	0,6	10,0	Turner 1949

Hemicellulosen

Den größten Anteil der Begleitsubstanzen stellen die Hemicellulosen dar. Hemicellulosen bezeichnen alle Polysaccharide der pflanzlichen Zellwand und Mittellamelle, die nicht die Struktur der Cellulose besitzen, mit dieser aber nicht-kovalent verbunden sind. Sie besitzen amorphe Strukturen mit niedrigem DP (50—200). Sie kommen in allen Schichten der Zellwand und in

193 Zur Erläuterung von geröstetem Flachs siehe Abschnitt „Röste„ S. 62.

der Mittellamelle vor, ihr größter Anteil ist in der Primärwand der Zelle vorhanden. Dort besteht ihre Funktion zusammen mit Pektin eine Permeabilität herzustellen. Erreicht wird diese Eigenschaft durch ein hohes Maß an Wasserhaltevermögen. Hemicellulosen nehmen mehr Feuchte als Cellulose auf und erhöhen die Aufnahme von Feuchte der Faser. Durch Sorption werden sie flexibel und ermöglichen als Bestandteil der Substanz zwischen den einzelnen Cellulose-Mikrofibrillen in der Sekundärwand deren Ausdehnung. Es finden sich keine publizierten Werte in welchem Ausmaß sie zur Aufnahme von Feuchte der Flachsfaser beitragen.[194]
Schroth schreibt den Hemicellulosen besondere Bedeutung innerhalb eines Flachsgewebes zu. Nach seiner Auffassung ist das materialtypische, feuchteabhängige Eingehen des Leinens auf die Hemicellulosen zurückzuführen. Diese Aussage wird jedoch nicht weiter begründet oder belegt.[195]

Pektine

Pektine sind Heteropolysaccharide und sind für den Zusammenhalt der Elementarfasern zu Bündeln, also zu der technischen Faser, verantwortlich. Diese Funktion übernehmen sie in der Mittellamelle. Darüber hinaus sind sie auch in der Primärwand der Zelle vorhanden. Damit die Faser leichter zu verarbeiten ist, wird das Pektin während der Fasergewinnung zu einem Großteil abgebaut, weshalb der verbleibende Anteil in der technischen Fasern gewissen Schwankungen unterliegt.[196] Auch die Ausgangspflanze kann auf den Gehalt von Pektin Einfluss nehmen.[197]
Über das hygroskopische Verhalten der Pektine wird in der Konservierungswissenschaft angenommen, dass der wasserlösliche Anteil des Pektins während der Fasergewinnung entfernt wird, weshalb der verbleibende Teil überwiegend hydrophober Natur ist.[198]

Lignin

In der Flachspflanze konzentriert sich der Ligningehalt auf den Holzteil des Pflanzenstängels. Während der Fasergewinnung wird dieser Teil des Stängels von den Bastfasern getrennt. In geringen Mengen (bis 2 %), abhängig vom Erntezeitpunkt, ist es auch zwischen den Cellulose-Mikrofibrillen, also innerhalb der Makrofibrillen, zusammen mit Hemicellulosen in der Flachsfaser eingelagert. Der Ligninanteil der Flachsfaser steigt mit späterer Ernte. Lignin ist eine aromatische Verbindung mit einem hohen Molekulargewicht und ist amorph aufgebaut. Der Li-

194 Florian 1987, S. 27—28; Schroth 1995, S. 16; Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 31—32; Batra 2007, S. 490; Brückle 2015a, S. 132—134.
195 Schroth 1995, S. 17.
196 Schroth 1995, S. 17; Turner 1949, S. P973.
197 Schilling 1930b, S. 275.
198 Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 32.

gninanteil beeinträchtigt den Wert der Faser in hohem Maß.[199] Das komplex aufgebaute Polymer ist hydrophob.[200]

Fette und Wachse

Fette und Wachse sind in vergleichsweise kleinen Anteilen in der Flachsfaser vorhanden (vrgl. Tab. 3.4, S. 57). Laut Schilling nehmen sie trotz ihres geringen Anteils Einfluss auf das hygrische Verhalten. Da sie selbst nicht hygroskopisch sind, setzen sie die Sorption des Fasermaterials herab. Weil ihr Schmelzpunkt zwischen 61 und 70 °C liegt, nimmt Schilling an, dass sie während des Nassspinnens im heißen Wasserbad schmelzen, gleichmäßig die Faser durchtränken und dadurch die Geschwindigkeit der Sorption verringern.[201]
Hönig kam nach einer Entfettung von Flachsfasern durch eine 3—4 stündige Extraktion mit Petroläther und Alkohol insgesamt zu höheren Anteilen der Fette (Tab. 3.5). Die Unterschiede können an dieser Stelle nicht bewertet werden, weil die jeweiligen Bestimmungsmethoden im Rahmen dieser Arbeit nicht recherchiert wurden.
Hönig untersuchte auch den Feuchtezuschlag für entfetteten Flachs. Seine Ergebnisse geben jedoch kein einheitliches Bild. Die einzelnen Ergebnisse sind im Anhang aufgelistet[202], jedoch fehlt innerhalb der Publikation eine Referenzmessung, sodass die Veränderung des Feuchtezuschlags vor und nach dem Entfetten nicht bewertet werden kann.[203]

Tabelle 3.5: Fettverlust in [%] bei 17—18,5 °C und 45—55 %rF durch Exktraktion in Petroläther und Alkohol nach Hönig 1918, S. 146—147.

Fasermaterial	Mittelwert des Fettverlustes [%]
Gehechelter Flachs, Wasserröste	6,22
Gehechelter Flachs, Tauröste	2,529
Gehechelter Flachs, überröstet	1,933
Flachs-Trockengespinst (Garn)	3,139
Flachs-Nassgespinst (Garn)	2,857

Aschegehalt

Der Aschegehalt besteht aus mineralischen Komponenten und schwankt zwischen 2,3—4 %. Detaillierte Angaben zur Zusammensetzung des Aschegehaltes von Flachsfasern finden sich bei Schilling et al.[204] Der Aschegehalt hat in der gesichteten Literatur keinen Stellenwert, lediglich Schilling widmet sich seiner Bedeutung im Flachsgarn. Er quantifiziert den Aschegehalt

199 Schroth 1995, S. 19—20.
200 Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 32—33.
201 Schilling 1930b, S. 275—276. Näheres zum Nassspinnen siehe S. 70.
202 Anhang A, Tab. A.10, S. 298.
203 Hönig, S. 158—159.
204 Schilling 1930a, S. 129—131.

zwischen 0,5 und 1,3 % und stellt fest, dass sein Einfluss auf das hygroskopische Verhalten bisher noch nicht festgestellt wurde.[205]

3.2.3 Zusammenfassung

Die Elementarfaser des Flachs kann mit einer durchschnittlichen Länge von 20—40 mm und einer Breite von 19—33 µm lichtmikroskopisch erfasst werden. Sie setzt sich aus mehreren, unterschiedlich zusammengesetzten Zellwandschichten zusammen. Die meiste Feuchte kann in der Sekundärwand (S_2) aufgenommen werden. Dort liegen die Celluloseketten im Wechsel zwischen amorphen und hoch geordneten, kristallinen Bereichen in fibrillären Strukturen vor. Wassermoleküle können nur in den amorphen Bereichen eindringen. Dort und an der Oberfläche der Micellen können sie über Wasserstoffbrückenbindungen gebunden werden. Der Kristallinitätsindex enthält Informationen über das Verhältnis von amorphen und kristallinen Bereichen und wird daher in Verbindung mit der Aufnahme von Feuchte gebracht. Seine Bestimmung an Textilfasern hat sich in der Konservierungswissenschaft bisher nicht etabliert.
In der Elementarfaser können Wassermoleküle in unterschiedlicher Form gebunden sein: als Monolayer direkt an der Cellulosekette (Chemisorption), an den Monolayer gebunden als mehrschichtiger Multilayer oder als freies Wasser. Weil die Celluloseketten auf supramolekularer Ebene durch Wasserstoffbrückenbindungen miteinander verbunden sind und dadurch ihren Aufbau zu Mikro- und Makrofibrillen bestimmen, sind Wechselwirkungen mit Wassermolekülen aus der Umgebung immer mit Veränderungen im supramolekularen Aufbau verbunden. Diese Wechselwirkungen sind nicht reversibel und können das anschließende hygrische Verhalten verändern. So führt eine trockene Erhitzung zu einer reduzierten Feuchteaufnahme, eine feuchte Erhitzung jedoch zu einer vermehrten Feuchteaufnahme.
Zwischenräume, Poren, Hohlräume nehmen Einfluss auf die Aufnahme von Wassermolekülen. Sie wurden jedoch in der Konservierungswissenschaft für Textilfasern bisher nicht definiert.
Die Aufnahme von Wassermolekülen führt vor allem in der Sekundärwand der Elementarfaser zu einem Aufweiten der parallel zueinander angeordneten Celluloseketten. Vor allem in der Breite nimmt das Volumen der Elementarfaser zu. Messungen dieser Dimensionsänderungen an der Elementarfaser sind bisher kaum publiziert. Die Herausforderung liegt in der Messtechnik. Daher beziehen sich die wenigen veröffentlichten Daten zumeist auf eine vollständige Quellung in flüssigem Wasser und nicht in Bezug auf die Aufnahme von Wasserdampf.
Während einige Autoren den Begleitstoffen, die neben Cellulose in der Elementarfaser vorhanden sind, eine gewisse Bedeutung hinsichtlich der Sorptionsfähigkeit einräumen, muss festgestellt werden, dass hierzu wenig konkrete Untersuchungen vorliegen. Den größten Einfluss scheinen die hygroskopischen Hemicellulosen zu nehmen. Ihr Einfluss ist jedoch nicht zwei-

205 Schilling 1930b.

felsfrei geklärt. Da sie den größten Anteil der Begleitsubstanzen ausmachen, wäre eine genauere Betrachtung wünschenswert, in welchem Maß sie das Sorptionsverhalten von Flachsfasern beeinflussen. Sowohl Lignin als auch Pektin scheinen keinen nennenswerten Einfluss auf das Sorptionsverhalten eines Flachsgewebes zu nehmen, weil sie in vergleichbar geringer Menge im Material vorkommen.

3.3 Flachsanbau und Gewinnung der technischen Faser

3.3.1 Flachsanbau

Verspinnbare Flachsfasern werden aus der Pflanze *Linum usitatissimum* L. gewonnen. Entsprechend der Nutzung wird zwischen Öl- und Faserlein unterschieden. Für die Fasergewinnung haben Anbau und Züchtung zum Ziel, Lein mit hohem Stroh- oder Faserertrag sowie guten bis ausgezeichneten Faserqualitäten zu produzieren. Dem Gegenüber steht der Öllein, mit robusten, standfesten stark verzweigten, kurzstrohigen Pflanzen. Zwischen diesen Extremen sind alle Zwischenformen möglich.[206] Inwiefern sich die daraus resultierenden Faserqualitäten auf das hygrische Verhalten des Fasermaterials auswirken, kann an dieser Stelle nicht bewertet werden, weil keine entsprechenden Untersuchungen publiziert sind. Es existieren zwar Übersichten der Arten innerhalb Linum usitatissimum L., z. B. von Schilling 1930 oder Dambroth/Seehuber 1988, es fehlt jedoch der Rückschluss zu Eigenschaften der daraus gewonnen Textilfasern.[207] Die Feinheit der technischen Faser wäre beispielsweise ein Kriterium, welches durch die Pflanzenwahl und den Anbau beeinflusst werden kann und welches sich auf das hygrische Verhalten auswirken kann. So haben Messungen von Querschnittsflächen an Viskosefasern gezeigt, dass die Feinheit der Faser die Querschnittsquellung beeinflusst. Je feiner die Faser, desto ausgeprägter fiel die Querschnittsquellung aus.[208] Dies ist wohl auf die höhere spezifische Oberfläche bei feinen Fasern im Vergleich zu groben zurück zu führen. Inwieweit dies auch auf Naturfasern übertragbar ist, ist bisher nicht überprüft worden.
Heute wird in der Züchtung üblicherweise ein Pflanzentyp angestrebt, der eine gewisse Länge des Stängels aufweist, sehr standfest ist, einen mittleren bis hohen Fasergehalt besitzt, verbunden mit mittlerer bis guter Faserqualität.[209] Inwieweit sich die Züchtungstendenzen mit unterschiedlichen Ergebnissen hinsichtlich der Fasereigenschaften historisch entwickelt haben

206 Dambroth/Seehuber 1988, S. 31.
207 Schilling 1930a, S. 57 und Dambroth/Seehuber 1988, S. 15—16.
208 Morehead 1947, S. 98.
209 Dambroth/Seehuber 1988, S. 29.

muss an dieser Stelle offen bleiben. Nach Aussage eines Flachsanbauers, wurden in den letzten 30 Jahren Züchtungsrichtungen bei der Flachspflanze bevorzugt, die einen höheren Faserertrag pro Fläche hervorbringen. Dadurch wurden die Fasern insgesamt gröber, wohingegen im historischen Flachsanbau eher auf Feinheit gezüchtet wurde, was heute als unökonomisch gewertet wird.[210] Während der Sichtung relevanter Literatur zu diesem Thema konnte diese Information jedoch nicht mit schriftlichen Quellen belegt werden.

3.3.2 Gewinnung der technischen Faser

Die relativ aufwendige und langwierige Gewinnung der Bastfasern aus der Pflanze und die anschließende Verarbeitung zu verspinnbaren Fasern haben sich im Laufe der Geschichte verändert. Eine vergleichende Betrachtung zwischen historischen und modernen Verfahren ist bisher nicht publiziert. Dies wäre hinsichtlich der qualitativen Bewertung historischer und zeitgenössischer Leinwände als Bildträger wünschenswert.
Die Verarbeitungsschritte der reifen Flachspflanze sind wie folgt:

Raufen (Ernte der Pflanze mit Wurzel), Trocknen, Riffeln (mechanisches Entsamen), Rösten der Stängel (enzymatisches Lösen der Bastfasern aus dem Stängel), Dörren, Brechen (Knicken der Holzteile), Schwingen (Entfernen der Holzteile), Hecheln (Parallelisieren der Fasern). [211] Im Folgenden werden jene Verarbeitungsgsschritte diskutiert, die Auswirkungen auf das hygrische Verhalten haben können.

Röste

Für die Gewinnung von spinnfähigen Rohfasern aus der Flachspflanze müssen Flachsstängel in einem gesonderten Prozess zunächst aufgeschlossen werden, um die für die Fasergewinnung relevanten Bastfasern isolieren zu können. Dies geschieht über die sogenannte Röste. Durch einen enzymatischen Abbau wird hauptsächlich das Pektin im Pflanzenstängel aufgelöst, um in anschließenden Bearbeitungsschritten die Bastfasern vom Rest des Stängels trennen zu können. Dabei wird der Holzteil so spröde, dass er bei den nachfolgenden mechanischen Behandlungen von den Bastfasern getrennt werden kann.[212] Einen Überblick über den verfahrenstechnischen Kenntnisstand der Röste gibt Schroth.[213]
Bis zur Einführung von industriell betriebener Röstanstalten um 1922 wurden in Deutschland die traditionellen Verfahren der Tau- und Wasserröste durchgeführt.

210 Freundliche mündl. Mitteilung von Egon Heger, Fa. Holstein Flachs, 17.02.2010.
211 Haudek/Viti 1981, S. 128—134.
212 Schilling 1930a, S. 117.
213 Schroth 1995, S. 23—64.

Bei der Tauröste liegen die aus der Erde gerauften Flachspflanzen in Bündeln auf dem Feld. Röstorganismen, zu einem Großteil Pilze, in geringem Ausmaß auch Bakterien, gelangen aus der Erde durch Wind oder Regen auf die Pflanzenoberfläche. Sie gelangen durch Spaltöffnungen am Stängel ins Pflanzeninnere. Dort bewirken sie den Abbau von Pektin und weiteren Substanzen der Bastfaserbündel. Der Abbau findet durch Enzyme statt, die von den Pilzen gebildet werden. Der Röstverlauf wird von Temperatur und Feuchtigkeit beeinflusst und unterliegt gewissen Schwankungen in der Qualität. Bei Trockenheit herrscht Röststillstand, dauert der enzymatische Abbau durch Dauernässe zu lang, kann es zur Überröstung kommen und die Elementarfasern werden geschädigt.[214]

Die Wasserröste ermöglicht gegenüber der Tauröste eine größere Einflussnahme auf den qualitativen Verlauf der Röste. Es existieren verschiedene Verfahrensvarianten. Im generellen Ablauf werden die gerauften Flachspflanzen unter die Oberfläche eines Gewässers gebracht, wo der enzymatische Abbau hauptsächlich durch Bakterien erfolgt. Bei der Durchführung durch kleinbäuerliche Erzeuger kamen dafür natürliche oder künstlich angelegte Teiche und Flüsse in Frage (Kaltwasserröste bei ca. 15—22 °C). Bei konstanter Nässe ist die Temperatur entscheidend für die Röstdauer. Durch das Einführen der Warmwasserröste wurde die Röstdauer verkürzt und es entstanden Röstanlagen mit größerer Kapazität. Je nach Qualität des zu röstenden Flachses wird das Wasser dabei auf 22—35°C erwärmt. Im Gegensatz zur Kaltwasserröste weisen die technischen Fasern jedoch eine geringere Qualität auf. Es wird jedoch nicht weiter ausgeführt in Bezug auf welche Eigenschaften die Qualität verringert wird, so z. B. die Feinheit, Festigkeit oder Länge.[215]

Im Laufe des 20. Jhs. haben sich in Abgrenzung zu diesen beiden traditionellen Röstverfahren verschiedene physikalisch-chemische Aufschlussverfahren entwickelt. Dazu gehören u. a. die Verbaumwollung (Kotonisieren), der Dampfdruckaufschluss und enzymatische Verfahren.

Bei den enzymatischen Verfahren werden anstelle der natürlich vorkommenden Mikroorganismen, die bei Tau- und Wasserröste wirken, künstlich hergestellte Enzymmischungen eingesetzt, die auf den Abbau der gewünschten Substanzen abgestimmt sind.[216]

Die Verbaumwollung wurde entwickelt um auch kurze Flachsfasern in ähnlichen, kostensparenden Methoden wie jene der Baumwolle verarbeiten zu können. Die technischen Fasern werden dabei praktisch bis zur Elementarfaser zerteilt und sind deutlich kürzer als die traditionell gewonnenen Langfasern. Dies kann an geröstetem Flachswerg einerseits auf rein mechanischem Weg geschehen. Andererseits kann Grünwerg (noch ungeröstetes Flachswerg) mit einem zusätzlichen chemischen Aufschlussverfahren, Laugenaufschlüsse oder kombinierte Chlor-Alkali-Verfahren, verwendet werden. Das so gewonnene Produkt wird kotonisierte Fasern oder auch Flockenbast genannt.[217]

---

214 Schroth 1995, S. 21—27.
215 Schroth 1995, S. 37—47 und Ullmanns s. v. Bastfasern, S. 183.
216 Schroth 1995, S. 55.
217 Ullmanns s. v. Bastfasern, S. 186—187 und s. v. Cotonisieren.

Auch der Dampfdruckaufschluss hat zum Ziel, spinnfähige Kurzfasern zu gewinnen. Schroth fasst diese Technik folgendermaßen zusammen: „Bei dieser Methode soll das thermodynamische Prinzip der Kavitation (Hohlraumbildung) während der schlagartigen Entspannung die nötige mechanische Fasertrennung bewirken. Pflanzenmaterial, das vorher bis zur Sättigungsgrenze mit Wasser benetzt wurde, wird in einen Druckbehälter eingebracht. Unter Erhöhung der Temperatur über die Siedegrenze wird der statische Druck im Behälter über den aktuellen Dampfdruck von Wasser angehoben. Nach einer definierten Einwirkungszeit wird dann schnell entspannt. Dadurch findet ein explosionsartiger Übergang des Wassers von der flüssigen in die Dampf-Phase statt. Diese plötzliche Änderung des Aggregatzustandes geschieht auch im Interzellularbereich des eingeführten Pflanzenmaterials. Als Folge werden dort Gewebestrukturen mechanisch auseinander gerissen und selbst Makromoleküle in kürzere Einheiten zerlegt.“[218] Für die Erzeugung von Langfasern, die für die Weiterverarbeitung zu Textilien benötigt werden, kommen die Verbaumwollung und der Dampfdruckaufschluss weniger in Frage. Für die Verarbeitung zu einem Bildträger des Leinwandgemäldes sind diese Sonderformen nicht ausgeschlossen, jedoch eher als Ausnahme zu erwarten. Da es hierzu jedoch keinerlei systematische Erfassungen gibt, ist die Beurteilung des Stellenwertes rein empirisch.
Trotz der Weiterentwicklung neuerer Aufschlussverfahren wird heute von Handel und Industrie in Europa für die Langfasergewinnung nach wie vor die Tauröste bevorzugt. Sie bringt immer noch die beste Faserqualität hervor. Neuere Techniken werden eher für die Gewinnung von Kurzfasern eingesetzt, die im technischen Bereich Anwendung finden.[219]
Als Grünflachs wird eine Faser bezeichnet, die ohne Röste oder sonstigen Aufschluss, lediglich durch mechanische Behandlung entholzt wird. In den 30er Jahren des 20. Jhs. wurde diese Art des Faseraufschlusses industriell möglich. Dabei können sowohl Grünlangfasern als auch Grünwerg gewonnen werden. Die Grünlangfaser wird zu Seilen oder groben Geweben weiter verarbeitet. Auch chemische Nachbehandlungen, wie das drucklose Kochen in Laugen kommen in Frage.[220]

Die Art und Dauer der Röste ist entscheidend für den verbleibenden Mengenanteil des Pektins in der technischen Faser.[221] Nach Turner wird der Pektinanteil von 3,8 % durch die Röste auf 1,8 % reduziert.[222] Einen deutlich höheren Anteil von Pektin in der technischen Flachsfaser publizierte Schilling (Tab. 3.6). Daraus ist ersichtlich, dass der Pektingehalt aufgrund verschiedener Röstarten schwankt.[223]

218 Schroth 1995, S. 50—51.
219 Schroth 1995, S. 64—65.
220 Ullmanns, s. v. Bastfasern, S. 186.
221 Schroth 1995, S. 17.
222 Turner 1949, S. P973.
223 Schilling 1930b, S. 275.

Tabelle 3.6: Anteile von Pektin in verschiedenen Hechelflächsen aus Schilling 1930b, S. 275.

Hechelflachs	Behandlung	Anteil Pektin [%]
Irischer	Wassergeröstet	7,02
Courtrai	Wassergeröstet	4,46
Russischer	Taugeröstet	6,45
Gewöhnlicher	Peufaillit-Röste	5,78
Courtrai	Mit Seife gereinigt	2,45

Neben den pektinischen Substanzen werden im Verlauf der Röste auch die Hemicellulosen partiell abgebaut. Der Abbau von Cellulose ist während der Röste unerwünscht. Wenn er gegen Ende der Röste in größerem Umfang auf die Faserzellwände übergreift führt es zu Stabilitäts- und Qualitätsverlusten im Fasermaterial.[224] Art und Dauer der Röste nimmt entscheidenden Einfluss auf die Qualität der technischen Faser hinsichtlich ihrer Feinheit, Festigkeit und Länge. Untersucht wurde dies von Schroth.[225] Er untersucht den Einfluss verschiedener Parameter, u. a. die Rösttemperatur, auf Qualitätsmerkmale wie Faserausbeute, Faserlänge, Faserfeinheit und Reißlänge. Die Faserausbeute betrifft wirtschaftliche Aspekte. Faserlänge und -feinheit und Reißlänge spiegeln sich in der Geometrie und Qualität der daraus entstehenden Garne und Gewebe wider, was in Bezug auf das Sorptionsverhalten in Abschnitt 3.4 aufgegriffen wird.

Schroths Vergleich der Sorptionsisothermen von ungeröstetem Grünflachs (feldgetrocknet) und Flachs nach der Tauröste zeigt, dass sich die Sorption durch den Faseraufschluss verändert (Abb. 3.12).[226] Demnach nimmt das geröstete Fasermaterial im mittleren Bereich der Umgebungsfeuchte (ca. 35 %—70 %rF) mehr Feuchte auf als der feldgetrocknete Grünflachs. Ober-

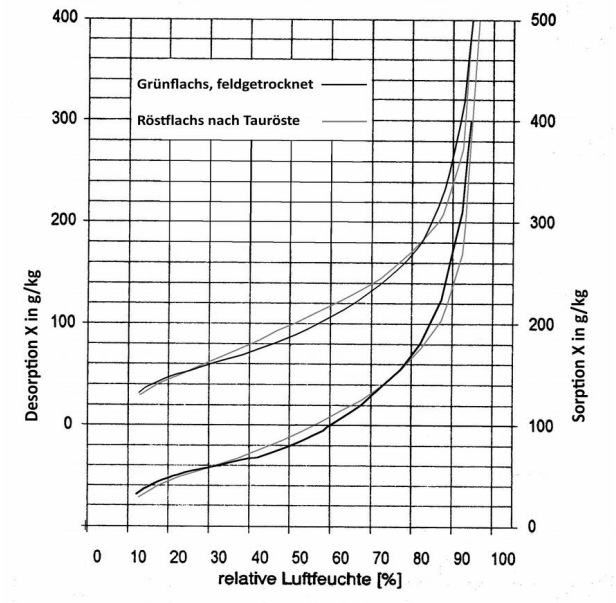


Abbildung 3.12: Sorptionsisotherme von Grünflachs, feldgetrocknet und Röstflachs nach der Tauröste.
Daten aus Schroth 1995, S. 104.

224 Sanio 1995, S. 17.
225 Schroth 1995.
226 Schroth 1995, S. 103—04.

halb 70 %rF verhält es sich umgekehrt. Der Unterschied beträgt 1—2 %. Hönig zeigt zwar keinen Vergleich von geröstetem und ungeröstetem Flachs, jedoch weist er einen Unterschied im Sorptionsverhalten von Flachsgarnen in Abhängigkeit der Röstart nach. Die Menge an aufgenommener Feuchte steigt von Wasserröste über Tauröste bis zum höchsten Wert für überrösteten Flachs (Tab. 3.7).[227] Der Unterschied im Feuchtezuschlag zwischen Wasser- und Tauröste beträgt im Höchstfall 0,66 %. Der größte Unterschied zwischen der Wasserröste und dem überrösteten Flachs liegt bei 1,61 %. Weil in den Daten der Vergleich zum nicht gerösteten Grünflachs fehlt, kann kein direkter Bezug zu Schroths Daten hergestellt werden.

Tabelle 3.7: Feuchtezuschlag [%] für gehechelten Flachs, unterschiedlich geröstet. Aus Hönig 1918, S. 119.

rF [%]	Temperatur [°C]	Wasserröste	Tauröste	Überröstet
80	18,3	12,93	12,97	13,45
69	28,3	10,08	10,09	10,98
69	28,4	10,06	10,09	11,08
60	28,6	9,01	9,24	10,42
57	29,4	8,91	8,99	10,22
48	27	7,63	8,29	9,24
40	27,2	6,97	7,21	8,56

Der Anstieg der Kristallinität in Flachsfasern nach der Röste, wie es von Kopczyński/Wlochowicz nachgewiesen wurde, scheint im Kontext mit den zuvor genannten Daten zur Sorption keinen Einfluss auf das Sorptionsverhalten zu haben, sonst würde sich durch die Dauer der Röste die Aufnahme von Feuchte verringern.[228]

Weitere Daten, wie die Röste das Sorptionsverhalten beeinflusst, sind nicht bekannt. Weil sich die moderneren Aufschlussverfahren in ihrem Prinzip deutlich von den traditionellen unterscheiden, ist zu erwarten, dass sich Unterschiede einstellen. Vor allem bei einem Aufschluss der Fasern mit Hilfe von Dampfdruck wird das Fasermaterial grundlegender verändert als es bei der Tauröste der Fall ist. Durch den hohen Druck kommt es zu Veränderungen auf allen strukturellen Ebenen, von der molekularen Ebene bis zur morphologischen Ebene. Es ist zu erwarten, dass das auf diese Weise entstandene Fasermaterial sich durchaus im Sorptionsverhalten anders verhält als die traditionell aufgeschlossenen Fasern. Diese Kurzfasern werden vor allem im technischen Bereich eingesetzt. Ob daraus auch Gewebe hergestellt werden, die als Bildträger der modernen Kunst in Frage kommen, bleibt an dieser Stelle offen.

227 Hönig 1918, S. 119.
228 Kopczyński/Wlochowicz 1966, S. 969.

Brechen, Schwingen und Hecheln

Nachdem der Röstprozess die Rindenschicht des Stängels gelockert hat, können die Faserbündel mechanisch aus dem Stängelverband gelöst werden. Historisch waren dafür mehrere Verarbeitungsschritte in Handarbeit nötig.

Zunächst wurden beim sogenannten „Boken" oder „Büllen" durch vorsichtiges Weichschlagen der Stängel, so z. B. mit einem Holz auf einem Klotz, die Faserbündel mechanisch vom Holzkörper getrennt. Im Anschluss erfolgte das eigentliche Brechen des Strohs, welches auch als Knicken bezeichnet wird. In der Flachsbreche wurde das Stroh zwischen zwei angeschärften Hölzern zerknickt bzw. gebrochen. Dabei fallen die kleinen Holzstückchen (Schäben) zum Großteil ab. Die übrigen Schäben werden beim Schwingen entfernt. Dabei wurde das Flachsstroh auf ein hochkant stehendes Brett gehalten, sodass eine Hälfte des Strohs frei herabhing. Mit einem flachen, angeschärften Brett, dem Schwingholz oder -messer schlug man die Reste der holzigen Bestandteile heraus.[229] Ein Teil der Faser wird beim Schwingen als Werg (kurze Fasern) herausgezogen. Dieses Schwungwerg wird von noch anhaftenden Schäben befreit und ist danach zu den gröberen Werggarnen verspinnbar. Die gewonnen Langfasern werden als Schwungflachs bezeichnet. Vor dem Spinnen werden die Langfasern durch das Hecheln gekämmt und verfeinert. Die hier nochmals anfallenden Kurzfasern werden als Hechelwerg bezeichnet.[230]

Die moderne Form der beschriebenen Verarbeitungsschritte findet in den sogenannten Flachsschwingen statt. Flachsschwingen stellen lange Maschinenstraßen dar, in denen die früher sämtlich von Hand durchgeführten Arbeitsschritte automatisiert hintereinander geschaltet sind.

Insgesamt durchläuft das Fasermaterial während der genannten mechanischen Bearbeitungen einem viele Teilschritte umfassenden Aussonderungsverfahren. Während der modernen maschinellen Durchführung verringert sich der ursprünglich vorhandene Gesamtfaseranteil im Röstflachs von 32 % auf 12 % Hechelflachs.[231]

Schwungwerg, welches zu Werggarnen versponnen wird, besteht bei heutiger maschineller Produktion aus zu etwa 44 % sauberen Fasern (kurze und lange gemischt), 8 % kurzen Fasern, 6 % Staub und 42 % Schäben.[232] Je nach Sorgfalt und Dauer der einzelnen Schritte können diese Schäben und Reste von Rindenteilen im Anteil variieren und sich auf das hygrische Verhalten auswirken.[233] Messungen von Schaposchnikoff haben gezeigt, dass die Schäben mehr Feuchte aufnehmen, als die technischen Fasern von Flachs (s. Tab. 3.8, S. 68). Die Unterschiede im Feuchtezuschlag lagen zwischen 1,4 und 2,35 %.

229 Dambroth/Seehuber 1988, S. 85; Hackel 1999.
230 Ullmanns s. v. Bastfasern, S. 185—186.
231 Schroth 1995, S. 6.
232 Dambroth/Seehuber 1988, S. 87.
233 Schilling 1930b, S. 275.

Tabelle 3.8: Monatliche Durchschnittswerte für den Feuchtezuschlag von Flachs, wassergeröstet, nach Schaposchnikoff 1928, S. 846.

Jahr	Monat	Durchschnitt Temperatur [°C]	Durchschnitt rF [%]	Feuchtezsuchlag Flachs [%]	Feuchtezsuchlag Flachsschäben [%]
1914	Juli	19,2	70	12,60	14,88
	August	14,1	69	12,59	14,85
	September	8,7	80	13,21	15,29
	Oktober	2,5	82	13,84	15,80
	November	-2,3	93	15,71	17,12
	Dezember	-2,7	90	16,43	18,03
1915	Januar	-5,2	93	17,00	18,59
	Februar	-3,8	88	16,89	18,76
	März	2,7	79	15,43	17,78
	April	9,3	60	12,83	15,11
	Mai	17,4	59	11,49	13,51
	Juni	19,5	61	11,21	13,07
	Juli	19,0	72	12,33	13,98
	August	15,2	76	13,04	14,74
	September	11,5	78	13,62	15,25
	Oktober	2,5	79	13,66	15,46
	November	-0,8	87	15,88	17,24
	Dezember	-3,0	89	16,97	18,38

Tabelle 3.9: Publizierte Werte für die Gleichgewichtsfeuchte von Flachs als technische Faser.

+ Die Werte für die relative Feuchte wurden mit zwei unterschiedlichen Geräten gemessen, beide Werte werden hier angegeben.

Material		Bedingungen	Feuchtezuschlag [%]	Quelle
Flachs Feinhechelwerg		20,13 °C / 49,9 bzw. 48,4 %rF +	8,30	Müller 1920 S. 161.
		22,80 °C / 65,5 bzw. 63,8 %rF	9,74	
		24,70 °C / 70,0 %rF	9,98	
		16,85 °C / 79,3 bzw. 78,0 %rF	11,04	
Gehechelter Flachs	Wasserröste	20,25 °C / 43,8 % rF	8,52	Hönig 1918 S. 108.
	Tauröste		8,72	
	Überröstet		9,57	
Flockenflachs		20 °C / 65 % rF	7,04/10,08 Mittelwert: 8,56	Bobeth 1941 S. 979—980.

Publizierte Werte zur Menge der aufgenommenen Feuchte von technischen Fasern, zeigen eine gewisse Schwankungsbreite (s. Tab. 3.9). Weitere Werte wurden in Form von monatlichen Durchschnittswerten von Schaposchnikoff publiziert (s. Tab. 3.8). Hönig nennt als Ursache für die Schwankungen die Faserart, ihre Modifikation, das Herkunftsland, die Reife bei der Ernte und die Verarbeitungsstufen.[234] Auch Scheithauer räumt der Vorbehandlung der Fasern einen gewissen Einfluss auf das Sorptionsverhalten ein.[235]

3.3.3 Zusammenfassung

Anbau und Ernte der Flachspflanze und die Art der Gewinnung der technischen Faser, nehmen Einfluss auf die Qualität der technischen Fasern, die im Anschluss versponnen werden. Dies spiegelt sich in ihrer Länge, Feinheit und Festigkeit der technischen Faser wieder. Des Weiteren werden vor allem durch Art und Dauer der Röste die Anteile der Begleitsubstanzen beeinflusst. Durch ein Überrösten kann auch die Cellulose der Elementarfaser geschädigt werden.

Inwiefern sich Anbau und Ernte der Flachspflanze, sowie die verschiedenen Schritte der Gewinnung der technischen Faser auf das hygrische Verhalten der technischen Faser auswirken, wird von verschiedenen Autoren unterschiedlich bewertet. Urquhart stellt fest, dass die üblichen textiltechnischen Verarbeitungsprozesse nur einen sehr kleinen Einfluss auf das hygrische Verhalten von Textilien haben und im Falle von Baumwolle wahrscheinlich innerhalb der Fehlergrenzen der Erfassung des Sorptionsverhaltens liegen.[236]

Morton/Hearle wiederum sehen in der Fasergewinnung, vor allem in den wässrigen Bearbeitungen, einen großen Einflussfaktor für die Sorptionsfähigkeit des daraus entstehenden Faserstoffes. Ursächlich dafür sind vor allem die Entfernung von nicht cellulotischen Begleitstoffen und die strukturellen Veränderungen der Cellulosemoleküle.[237] Tatsächlich wurde durch Hönig gezeigt, dass die Art der Röste Einfluss auf die Feuchteaufnahme von Hechelflachs nimmt. Er räumt der Faserart bzw. ihrer Modifiaktionen, dem Herkunftsland, der Reife bei der Ernte und den Verarbeitungsstufen einen großen Einfluss ein.[238] Durch die mechanischen Verarbeitungsschritte sind unterschiedliche Anteile von Schäben zu erwarten, die sich auf das hygrische Verhalten auswirken werden.

Es ist anzunehmen, dass die modernen Aufschlussverfahren zur Gewinnung von Flockenbast erheblichen Einfluss auf das hygrische Verhalten nehmen, weil die so gewonnen Fasern auf molekularer, supramolekularer und morphologischer Ebene erhebliche Unterschiede im Aufbau zu traditionell aufgeschlossenen Fasern aufweisen.

234 Hönig 1918, S. 79.
235 Scheithauer 1941.
236 Urquhart 1960, S. 25.
237 Morton/Hearle 1993, S. 170.
238 Hönig 1918, S. 79.

Systematische Untersuchungen über den Einfluss der genannten Verarbeitungsschritte auf das hygrische Verhalten der technischen Fasern liegen bisher nicht vor. Aus den vorliegenden, einzelnen Studien kann an dieser Stelle kein einheitliches Bild gezeichnet werden, wodurch der Forschungsbedarf abgeleitet werden kann. Vor allem wäre eine vergleichende Untersuchung aufschlussreich, die sich mit historischen und modernen Vorgehensweisen beschäftigt.

3.4 Garn

3.4.1 Verspinnen der technischen Fasern zum Garn

Beim Verspinnen der technischen Fasern werden diese spiralförmig um die Längsachse zu einem Garn verdreht. Historisch wurden Garne mit der Handspindel hergestellt. Es ist davon auszugehen, dass auch nach der Einführung der handbetriebenen Spinnräder im 13. Jh. die Handspindel noch eingesetzt wurde. Die handbetriebenen Spinnräder dienten hauptsächlich der Baumwoll- und Kurzfaserverarbeitung. Gegenüber der handbetriebenen Spinnräder konnten mit der Handspindel gleichmäßigere Garne hergestellt werden. Erst mit der Einführung des Flügelspinnrades im 15. Jh., welches mit dem Fuß angetrieben wurde, konnten auch mit einem Spinnrad Garne aus Langfasern in gleichmäßiger Qualität hergestellt werden. Mitte des 18. Jhs. wurden in England die ersten Maschinen zum Verspinnen von Fasern entwickelt und produziert.[239] Jedoch blieb das Spinnen von Flachsfasern noch lange Handarbeit, mindestens bis Mitte des 19. Jhs., weil sich die maschinelle Entwicklung hauptsächlich auf die Verarbeitung von Baumwolle konzentrierte.[240] In Kontinentaleuropa begann das maschinelle Spinnen nach 1850 in Bezug auf Flachs. Jedoch wurde maschinell gesponnenes Garn auch schon früher aus England importiert.[241] Zur kunsttechnologischen Verwendung von Geweben aus maschinell produzierten Garnen sind bisher keine Erkenntnisse publiziert worden.
Das maschinelle Spinnen des Fasermaterials zu einem Garn umfasst heute einen vielstufigen Arbeitsprozess. Dazu gehört die Reinigung des Rohstoffes, die Ordnung der Fasern und schließlich über das Vorgarn die Erzeugung des Garnes auf der Feinspinnmaschine, wobei die Fasern spiralförmig um die Achse des Garns gelegt werden. Im engeren Sinn wird hier die Arbeit der Feinspinnmaschine beleuchtet, d. h. die Überführung des Vorgarnes auf den

239 Bohnsack1981, S. 16—29, 139, 148.
240 Grothe 1868, S. 79.
241 Mecheels et al. 2009, S. 294.

gewünschten Garnquerschnitt durch Strecken, die Drehung des so gewonnenen Faserverbandes zum fertigen Garn und Aufwickeln des Garnes auf eine Spule.[242]
Versponnen werden sowohl Lang- als auch Kurzfasern, die als Werg bezeichnet werden. Für hochwertige Garne werden jedoch Langfasern bevorzugt verwendet. Flachs- und Flachswerggarne werden heute in der Regel nass versponnen, um sie geschmeidiger und formbarer zu machen. Auf diese Weise entstehen feinere Garne von höherer Gleichmäßigkeit. In den Nass–spinnmaschinen wird das Vorgarn einer Nassbehandlung im aufgeheizten Wasserbad unterzogen bevor es weiter versponnen wird. Das Wasser hat Temperaturen zwischen 40—60 °C. Je nach Menge der eingebrachten Feuchte bzw. ihrer Temperatur, wird von Halbnass- oder Kaltnassverfahren gesprochen. Beim Halbnassspinnen wird das Vorgarn nur mit wenig Wasser leicht befeuchtet. Es hat den Zweck, die abstehenden, kleinen Fasern durch Anfeuchten dem Faden wieder anzulegen und sie geschmeidiger zu machen, wodurch das Garn glatt und rund wird.[243]
Beim Trockenspinnverfahren erfolgt die Ausspinnung der Fasern zu gröberen Garnen ohne vorhergehende Nassbehandlung des Vorgarns.[244] Das trocken versponnene Garn ist rauh und ungleichmäßig, da die trockenen Fasern wenig schmiegsam sind.[245]
Die konservierungswissenschaftliche Forschung hat sich bisher nicht damit auseinander gesetzt, wie sich die verschiedenen Arten des Spinnens auf die Eigenschaften der daraus entstehenden Garne auswirken. Auch in der gesichteten textiltechnischen Literatur wurden diesbezüglich keine Informationen gefunden.

Bezüglich der Feuchteaufnahme von unterschiedlich gesponnenen Garnen sind von Hönig verschiedene Werte erfasst worden, die in Tab. 3.10 (S. 72) zusammengefasst sind. Messreihe 1 entsprach dem Wägen der Flachsproben in einem nicht aktiv klimatisiertem Raum. In Messreihe 2 wurden die Proben in einem geschlossenen Gefäß konditioniert, welches durch Salzlösungen klimatisiert wurde. Beide Messreihen kommen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Messreihe 2 ergab, dass halbnass versponnene Garne die meiste Feuchte aufnehmen, gefolgt von trocken und nass versponnenen Garnen. Nach Messreihe 2 nahmen ebenfalls die Halbnassgespinste am meisten Feuchte auf, jedoch zeigte danach das nass gesponnene Garn höhere Werte als das Trockengespinnst. Durch diesen Widerspruch sind die Daten nicht eindeutig zu interpretieren. Eine Diskussion zu den Unterschieden findet nicht statt. Auch wird keine Ursache für die Unterschiede bei den unterschiedlich gesponnen Garnen ergründet. Der Grund kann entweder der Einsatz von Feuchte beim Spinnen selbst sein, oder die daraus resultierenden Unterschiede in der Geometrie der Garne. Die Daten von Hönig beinhalten jedoch keine Charakterisierung der jeweiligen Garngeometrien, sodass ein Rückschluss an dieser Stelle nicht möglich ist.

242 Textillexikon s. v. Spinnen.
243 Textillexikon s. v. „Bastfaserspinnerei“ und „Naßspinnmaschine für Bastfasergarne“; Driesch 1951, S. 142.
244 Textillexikon s. v. „Trockenspinnmaschine für Bastfasergarne“.
245 Driesch 1951, S. 142.

Anand der Daten von Hönig kann ein Vergleich innerhalb von wassergeröstetem Flachs angestellt werden, der zeigt, dass die technische Faser in Form von Hechelflachs mehr Feuchte aufnimmt als das daraus gesponnene Garn, unabhängig von der Art des Spinnens (Vrgl. Tab. 3.10 und Tab. 3.7, S. 66).

Tabelle 3.10: Feuchtezuschlag [%] von unterschiedlich versponnenen, wassergerösteten Flachsfasern nach Hönig 1918.

rF [%]	Temperatur [°C]	Nass	Halbnass	Trocken	Quelle
Messreihe 1					
43,8	20,25	7,69	8,24	7,72	Hönig 1918, S. 108
Messreihe 2					
80	18,3	12,24	12,68	12,18	Hönig 1918, S. 119
69	28,3	9,10	9,63	9, 05	
69	28,4	9,14	9,59 (68 %rF)	9,05 (68 %rF)	
60	28,6	8,16	8,60	8,01	
57	29,4	8,03	8,49	7,84	
48	27	7,27	7,43	6,96	
40	27,2	6,52	6,83	6,44	

Tabelle 3.11: Feuchtezuschlag [%] von Flachs nach unterschiedlichen Autoren.

Material	Bedingungen	Feuchtezuschlag [%]	Quelle
Flachs, nicht näher definiert.	Temp. o. A. / 65 % rF	9,0—10	Mally 1995, S. 215.
Flachs, nicht näher definiert.	21,1 °C / 65 % rF	12	Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 15.
Flachs, nicht näher definiert.	20 °C / 65 % rF 20 °C / 100 % rF	9 17	Haudek/Viti 1981 S. 63.

Tabelle 3.12: Feuchtezuschlag [%] für Flachsgarn nass gesponnen und roh, Nm 18,2 (NeL 30) bei 20 °C und verschiedenen relativen Feuchten nach Scheithauer 1941.

Zur Definition von Nm und NeL siehe Anhang A.1, S. 299.

30 % rF (Desorption)	65 % rF (Sorption)	65 % rF (Desorption)	80 % rF (Sorption)
5,95	10,01	10,03	11,80

3.4.2 Garngeometrie

Durch das Spinnen entstehen Garne von unterschiedlicher Qualität in Abhängigkeit der verwendeten Fasermaterialien und ihrer Verarbeitung. Die Unterschiede hinsichtlich ihrer Geometrie finden sich vor allem in der Konstruktion des Garns, in seiner Drehrichtung und -stärke, in der Ungleichmäßigkeit und der Feinheit.[246] Die Faserlänge (Langfasern oder Werg) hat direkten Einfluss auf die Drehungsstärke und die Festigkeit der Garne weil kurze Fasern weniger fest miteinander verdreht werden können.[247]

Aus konservierungswissenschaftlicher Sicht ist bisher nicht untersucht worden, wie sich hand- und maschinengesponnene Garne in ihrer Geometrie und ihren Eigenschaften unterscheiden. Dennoch werden in der Fachliteratur immer wieder Unterschiede angenommen. So wird von maschinell gesponnenen Garnen angenommen, dass sie in der Regel dichter gesponnen sind im Vergleich zu handgesponnenen Garnen.[248] Darüber hinaus wird zuweilen auch angenommen dass sie mehr Feuchte aufnehmen können.[249] Verwendbare Daten existieren bisher weder über die Unterschiede in der Geometrie, noch zur Aufnahme von Feuchte. Erschwert wird dieser Umstand dadurch, dass Garne im textilen Bildträger nicht zweifelsfrei der manuellen oder maschinellen Produktion zugeordnet werden können.

Die Auswirkungen der Faserquellung auf das Garn wurde von Collins am Beispiel der Baumwolle beschrieben und wird im Folgenden zusammengefasst.[250] Die Mechanismen lassen sich auf Flachs übertragen, weil im wesentlichen die geometrischen Merkmale des Garnes bestimmend sind.

Die bereits beschriebene Breitenquellung der Elementarfasern und damit auch der technischen Fasern und das damit verbundene anisotrope Verhalten, lässt sich auf das Garn übertragen: Quellen die technischen Fasern, vergrößert sich auch der Querschnitts des Garnes. Daraus resultiert die Verkürzung des Garnes, weil die spiralförmig um die Achse des Garns liegenden Fasern einen längeren Weg zurücklegen müssen. Wäre der Faden frei, würde sich der Faden aufdrehen, um diese Strecke auszugleichen. Eine starke Verdrehung des Garns bringt eine stärkere Verkürzung aufgrund von Quellung mit sich. Gleichzeitig ist die Breitenquellung in Garnen mit einer hohen Verdrehung ohnehin schon größer, was die Verkürzung zusätzlich steigert. Insgesamt ist die Verkürzung des Garns jedoch relativ gering und nicht verantwortlich für die Verkürzung des Gewebes aufgrund von Quellung, wie im weiteren Verlauf über das Gewebe geschildert wird. Im Falle von Baumwollgarn liegt die Verkürzung in der Regel zwischen 1 % und 2 %.[251] Wie hoch die Verkürzung eines Flachsgarnes ist, kann der Fachliteratur nicht ent-

246 Für die Definition der einzelnen Merkmale siehe Kapitel 5.1.4, S. 165ff.
247 Hofer 2000, S. 83—84.
248 Andersen et al. 2009, S. 39, 45; Berger 2000, S. 66; Hedley 1993, S. 114.
249 Andersen et al. 2009, S. 45.
250 Collins 1939.
251 Collins 1939, S. P48—P49.

nommen werden. Der Grad der Verkürzung hängt nicht mit der Drehungsrichtung des Garns zusammen.[252]

Für das Ausmaß der Breitenquellung ist zunächst entscheidend, wie dicht die technischen Fasern im Garn aneinander liegen. Weisen sie Zwischenräume zueinander auf, wie in einem locker verdrehten Garn, haben sie einen bestimmten Raum, der bei einer Quellung zunächst gefüllt wird, bevor sich das Garn im Querschnitt verändert. Das Ausmaß der Quellung eines sehr kompakten Garns kann wiederum mit der einer einzelnen technischen Faser vergleichbar sein.[253] An Baumwolle wurde nachgewiesen, dass die Sorptionsfähigkeit herabgesetzt wird, wenn auf die Fasern Druck ausgeübt wird, wie es im Falle der Verdrehung der Fasern zu einem Garn der Fall ist.[254] Ob sich daraus ableiten lässt, dass es prinzipielle Unterschiede zwischen hand- und maschinengesponnenen Garnen im Ausmaß der Quellung gibt, kann an dieser Stelle nur eine theoretische Überlegung bleiben, weil entsprechende Untersuchungen nicht vorliegen. Die Messung des Porenvolumens am Garn wäre hier aufschlussreich, wird jedoch selten angewandt, weil das Interesse insgesamt mehr bei den Kennwerten für Flächengebilde (z. B. Gewebe) liegt und es an praktikablen Messmethoden für die Prüfung des Volumens von Garnen, welches für die Erfassung des Porenvolumens notwendig ist, fehlen.[255]

Scheithauer zeigt für Flachsgarne, dass sie weniger Feuchte aufnehmen, je höher ihre Feinheit ist (siehe Tab. 3.13).[256] Als Ursache benennt er den geringeren Anteil an hygroskopischen Begleitstoffen je feiner das Fasermaterial und dadurch das Garn ist. Je geringer der Anteil an hygroskopischen Begleitstoffen, desto geringerer der Gehalt an Feuchte. Die von Scheithauer angegebene Feinheit in Nm (Nummer metrisch) ist definiert als Masse pro Längeneinheit.[257] Je feiner das Garn, desto weniger Material ist, bezogen auf eine bestimmte Länge, vorhanden, d. h. es ist dünner. Dadurch weist es auch eine andere Geometrie auf. Ob dies auch ursächlich mit den unterschiedlichen Werten für den Feuchtezuschlag zusammenhängt, wurde bisher nicht untersucht.

Scheithauers Ergebnisse zeigen, dass Flachswerggarne insgesamt einen niedrigeren Feuchtezuschlag zeigten, als Flachsgarne der gleichen Feinheit (Tab. 3.13). Als Ursache wurden erneut die im Werggarn weniger vorhandenen hygroskopischen Begleitstoffe genannt. Dass im Werggarn weniger Begleitstoffe vorhanden sind, kann nicht nachvollzogen werden, es sind jedoch keine weiteren Untersuchungen bekannt, mit denen diese Ergebnisse verglichen werden könnten.

252 Hofmann 2002, S. 48.
253 Collins 1939, S. P48—P49.
254 Nickerson 1954, S. 212.
255 Kleinhansl 2000b, S. 307.
256 Scheithauer 1941, S. 67. Die vollständigen Daten befinden sich in Tabellen A.3 und A.4, S. 295.
257 Thomas/Reumann 2000b, S. 253.

Tabelle 3.13: Feuchtezuschlag [%] von Flachsgarn, nassversponnen, unterschiedlicher Garnnummer bei 20 °C/65 %rF.

5 Nm = 5 m Garn wiegen 1 g. Daten aus Scheithauer 1941, S. 68.

	Nm 15,2	**Nm 18,2**	**Nm 24,2**	**Nm 36,4**
Flachsgarn	10,05	10,01	9,90	9,88
Flachswerggarn	9,85	9,95	-	-

3.4.3 Schlichte

Vor dem Weben werden die Kettfäden mit einer Schlichte versehen, um sie widerstandsfähiger gegen die mechanische Beanspruchung während des Webens zu machen. Zwei Quellen weisen darauf hin, dass das ungebleichte Garn vor dem Weben in Aschen- oder Pottaschenlauge gekocht wurde, wodurch es gereinigt werden sollte und eine verbesserte Haftung der Schlichte erreicht wurde.[258] Das Kochen in heißer Lauge verbessert die Sorptionseigenschaften des Fasermaterials.[259]

Eine kurze Übersicht der historischen Entwicklung der Schlichtemittel ist durch Mecheels et al. erarbeitet worden.[260] Demnach war über viele Jahrhunderte Stärke das nahezu ausschließliche Schlichtemittel. Grundlegend veränderte sich dies erst in der zweiten Hälfte des 20. Jhs. In den 1920er Jahren kamen Produkte auf Eiweißbasis auf, die jedoch bald durch synthetische Schlichtemittel abgelöst wurden.[261]

Nachweise von Schlichten an originalen Bildträgern sind nicht bekannt. Folgende Bindemittel dürften laut Literatur des 18. und 19. Jhs. für die Zeit vor dem 19. Jh. angenommen werden, diese erheben jedoch keinen Anspruch auf Vollständigkeit: Kleister aus Roggen- oder Weizenmehl evtl. mit Zusätzen von Leim oder Talg, Kartoffelstärke und dünnflüssiger tierischer Leim.[262] Im 19. und 20. Jh. kommen weitere Bindemittel hinzu, darunter modifizierte Stärken, wasserlösliche Cellulose und Stärkederivate, Pflanzenschleime, wasserlösliche Kunststoffe und Kunststoffdispersionen wie auch trocknende Öle.[263]

Die Schlichte kann in das Garn unterschiedlich tief eindringen. Um die Durchdringung zu verbessern wurde das Tränken teilweise auch nahe dem Siedepunkt durchgeführt, um alle Luft entweichen zu lassen.[264]

Je nach Verwendungszweck können die verwendeten Bindemittel ausgewaschen worden sein (entschlichtet) oder noch im Garn vorhanden sein. Bis zu Beginn des 20. Jhs. hatte man für die Entfernung der Stärke-Schlichten nur die Möglichkeit, das zu entschlichtende Material über

258 Halle 1761, S. 384; Gilroy et al. 1847, S. 605.
259 Siehe Abschnitt „Bleichen“ S. 80.
260 Mecheels et al. 2009.
261 Mecheels et al. 2009, S. 524.
262 Halle 1761, S. 385; Gilroy et al., S. 31 und Grothe 1861, S. 80—81.
263 Textillexikon s. v. „Schlichten“ und „Schlichtemittel“.
264 Barlow 1878, S. 402.

vierundzwanzig Stunden und länger in Wasser einzlegen oder die Schlichte durch alkalisches Kochen zu entfernen. Seltener wurde dich Schlichte durch ein Schwefelsäure enthaltendes Bad entfernt, wobei ein hydrolytischer Abbau erfolgte.[265]
Je nach verwendeter Schlichte kommen zum Entfernen in heutigen Verfahren Waschen in heißem Wasser, Behandlungen mit Säuren oder Alkalien, Enzyme oder oxidative Prozesse zur Anwendung.[266] Es ist davon auszugehen, dass verbliebene Anteile je nach Art des Bindemittels und Menge, Einfluss auf das hygrische Verhalten des Garns nehmen. Konkrete Untersuchungen hierzu existieren jedoch nicht.

3.4.4 Maximale Wasseraufnahme

In Abgrenzung zur Aufnahme von Wasserdampf (Trockenquellung) existieren auch Werte für die maximal mögliche Aufnahme von Wasser in flüssiger Form (Nassquellung). Im Gegensatz zur Trockenquellung bei nahezu 100 %, können Flachsfasern flüssiges Wasser in deutlich höheren Mengen aufnehmen. Dafür verantwortlich ist der poröse Charakter des Materials.
Eine Methode, den Feuchtezuschlag aufgrund der Nassquellung zu bestimmen, ist die vollständige Tränkung in Wasser und Aufzeichnen der Masse während der Trocknung. Die Trocknung verläuft zunächst linear, wonach an einem bestimmten Punkt eine Verlangsamung eintritt und sich die Rate der Trocknung ändert. Dieser Punkt wird interpretiert als jener Punkt, an dem alles freie Wasser entfernt ist, also das Maximum an gebundenem Wasser erfasst wird. Es entspricht dem Feuchtezuschlag bei 100 % rF. Für Flachs wurde an diesem Punkt ein Feuchtezuschlag von 40,1 ± 0,5 % ermittelt.[267]
Eine alternative Methode ist die Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens. Auch hier wird das Material in Wasser gequollen, anschließend jedoch zentrifugiert. Auf diese Weise wurde für Flachs ein Feuchtezuschlag von 65,2 ± 0,3 % ermittelt. Die Flachsgarne wurden in diesem Fall fünf Minuten in destilliertem Wasser unter Zugabe von einem Netzmittel gekocht und über Nacht bei Raumtemperatur im Wasser belassen.[268] Andere Messungen ergaben für Flachs 55 %[269] bzw. 54,5 % und 63,5 %[270].
Cotterill gibt einen Feuchtezuschlag von 46—52 % an.[271] Jedoch gibt er keine Erklärung zu der Methode, wie der Wert erfasst wurde.

265 Mecheels et al. 2009, S. 524.
266 Stöckigkt 1990 S. 25ff.
267 Welo et al. 1952a, S. 256.
268 Welo et al. 1952b, S. 263 und 265.
269 Preston/Nimkar 1949, S. P681.
270 Marsh 1948, S. 418.
271 Cotterill 1950, S. P9.

3.4.5 Vergleich zu Baumwolle

In der textiltechnischen Literatur sind im Vergleich zu Flachs wesentlich mehr Daten zum hygrischen Verhalten der Baumwolle publiziert. Weil in der konservierungswissenschaftlichen Literatur immer wieder der Vergleich zwischen Flachs und Baumwolle hergestellt wird, dabei jedoch kein Konsens herrscht, soll an dieser Stelle eine kurze Zusammenfassung der publizierten Daten gegeben werden.

In der textiltechnischen Literatur wird die Gleichgewichtsfeuchte der Baumwolle im Vergleich zum Flachs niedriger angegeben. Dies ist an publizierten Sorptionsisothermen nachvollziehbar (Abb. 3.13, S. 78).[272] In der konservierungswissenschaftlichen Literatur wird dies in gleicher Weise von Timár-Balázsy dargestellt. Sie begründet die höhere Gleichgewichtsfeuchte von Flachs mit dem höheren Anteil von hygroskopischer Hemicellulose und dem Vorhandensein einer ebenfalls hygroskopischen Mittellamelle, die bei Baumwollfasern nicht vorhanden ist. Darüber hinaus sind die Poren und Hohlräume der Flachsfasern leichter für die Feuchte zugänglich, weil Baumwolle durch ihre Drehung der Fasern dichter und weniger zugänglich für die Feuchte aus der Luft ist.[273] Eine Überschneidung der Sorptionsisothermen von Flachs und Baumwolle lässt sich bei Stolow und Wessel erkennen, insofern dass Baumwolle nur bis zu einer rF von ca. 75 % rF eine geringere Gleichgewichtsfeuchte aufweist. Dort kreuzen sich beide Kurven und Baumwolle zeigt im weiteren Verlauf eine höhere Gleichgewichtsfeuchte als Flachs.[274] Eine Erklärung geben Batra und Wessel: ihrer Meinung nach ist die Mittellamelle in der Flachsfaser dafür verantwortlich, dass Flachs zunächst mehr Feuchte aufnehmen kann als Baumwolle. Diese Aussage findet sich auch bei Timár-Balázsy. Bei höheren Feuchten jedoch behindert das in der Flachsfaser vorhandene Lignin die weitere Aufnahme von Feuchte, sodass Baumwolle hier mehr Feuchte binden kann.[275] Allerdings sind Mittellamelle und Primärwand relativ dünn und werden während der textiltechnischen Verarbeitung der Fasern leicht zerstört, z. B. bei der Röste.[276]

Ganz gegensätzlich zu den bisher genannten Publikationen wird die Sorption von Baumwolle und Flachs bei Mally dargestellt (Abb. 3.14, S. 78). Sie zeigt, dass Baumwolle eine höhere Gleichgewichtsfeuchte als Flachs aufweist ohne Überschneidung beider Kurven.[277] Die Abweichung ihrer Ergebnisse wird jedoch nicht diskutiert. Aufgrund fehlender Informationen zu Ausgangsmaterialien und Bedingungen der Durchführung, können die aufgezeigten Unterschiede an dieser Stelle nicht erklärt werden.

272 Bobeth 1941, S. 976; Sommer 1956, S. 2; Schaposchnikoff 1928, S. 845.
273 Timár-Balázsy/Eastop 1998, S. 34.
274 Stolow, S. 9; Wessel 2000, S. 38.
275 Batra 2007, S. 490—491; Wessel 2000, S. 38—41.
276 Opitz 1940, S. 35.
277 Mally 1995, S. 214.

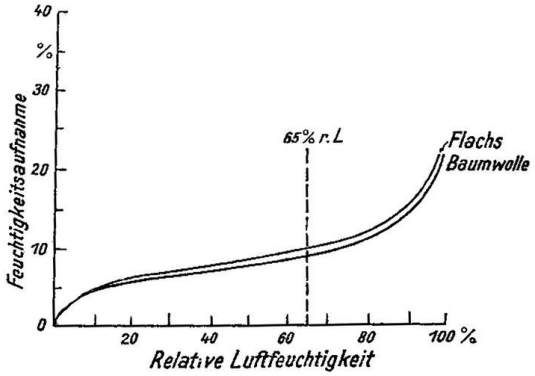


Abbildung 3.13: Sorptionsisothermen von Baumwolle und Flachs nach Sommer 1956, S. 2 (verändert).

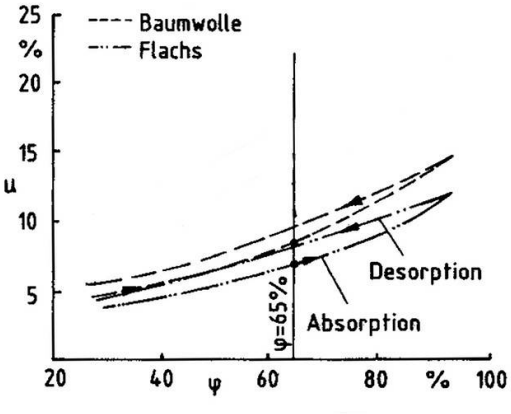


Abbildung 3.14: Sorptionsisothermen von Baumwolle und Flachs erstellt von Mally bei 20—22 °C, Mally 1995, S. 214 (verändert).

3.4.6 Zusammenfassung

Durch das Spinnen entstehen Garne von unterschiedlicher Geometrie. Es gibt jedoch keine Belege, dass die Art des Spinnens (z. B. manuell oder maschinell) Einfluss auf diese Geometrie nimmt. Einzelne Untersuchungen belegen, dass die Geometrie die Aufnahme von Feuchte im Garn beeinflusst. Hinsichtlich des maschinellen Spinnens deuten einzelne Untersuchungen darauf hin, dass die Art des Spinnens die Aufnahme von Feuchte beeinflusst. Die Ursache dafür ist jedoch unklar. In Bezug auf handgesponnene Garne liegen keine entsprechenden Untersuchungen vor.

Es existieren keine experimentellen Daten über die Veränderung der Feuchteaufnahme des Garns beim Vorhandensein von Schlichten. Es ist jedoch davon auszugehen, dass ein Einfluss in Abhängigkeit von Menge und Art des Bindemittels besteht.

Die publizierten Werte zur Gleichgewichtsfeuchte von Flachsgarn unterliegen gewissen Schwankungen. Für 20 °C und 65 % rF liegt der Feuchtezuschlag zwischen 9 und 12 %. Weil die untersuchten Flachsfasern nicht immer exakt charakterisiert sind, kann der Grund dieser Schwankungen nicht benannt werden. Die Durchsicht von publizierten Werten, wie viel Feuchte Flachs aufnehmen kann, hat gezeigt, dass sich die in der Fachliteratur angegebenen Werte auf wenige sehr frühe Quellen reduzieren lassen. Gleiches gilt für Sorptionsisothermen von Flachs, aus denen sich ebenfalls Werte für die Materialfeuchte ableiten lassen. Bobeth äußert sich zu der Qualität dieser Isothermen insofern, dass er empfiehlt die Isothermen mit den heutigen Apparaten nochmals aufzunehmen, um verlässlicher deren tatsächlichen Verlauf vorliegen zu haben.[278]

278 Bobeth 1993, S. 236.

Für eine detaillierte Betrachtung unbrauchbar sind die im Handel üblichen Angaben zum Feuchtezuschlag für Flachs von 12 %[279], die zur Berechnung des Handelsgewichtes herangezogen werden. Sie stimmen mit den tatsächlichen Anteilen keineswegs überein.
Angaben zu Dimensionsänderungen von Garnen, ihre Breiten- und Längsquellung, fehlen gänzlich in der gesichteten Literatur. Werte von Elementarfasern oder technischen Fasern können nicht auf das Garn übertragen werden, weil dann die jeweilige Garngeometrie unberücksichtigt bleibt.

3.5 Gewebe

3.5.1 Weben

Für die Herstellung eines Gewebes werden zwei Fadensysteme, Kett- und Schussfäden senkrecht zueinander verwebt. Auf diese Weise können verschiedene Bindungsarten im Gewebe entstehen. Für die maltechnische Verwendung steht die Leinwandbindung im Vordergrund, wobei auch andere Bindungsarten zu finden sind.[280] Durch die Verwendung von Garnen unterschiedlicher Geometrie, sowie ihr jeweiliger Abstand zueinander kann variieren und lässt Gewebe von unterschiedlicher Geometrie entstehen. Dabei sind der Variationsvielfalt wenig Grenzen gesetzt. Von der sogenannten Netzleinwand, die hohe Garnzwischenräume aufweist, bis zu sehr schweren und dichten Geweben, sind kunsttechnologisch alle Varianten von Geweben denkbar. Die Geometrie ist einflussgebend auf das hygrische Verhalten.
Historisch fand das Weben auf Handwebstühlen statt. Die Einführung entsprechender Maschinen zum Weben beschränkte sich zunächst auf Baumwolle und Wolle. Der maschinell angetriebene Webstuhl konnte sich in England um 1830 etablieren.[281] In Deutschland wurden frühestens in der zweiten Hälfte des 19. Jhs. Flachsgewebe maschinell produziert.[282] Ein Vergleich der manuellen und maschinellen Weberei wurde von Zenker zusammengefasst, jedoch wurden daraus keine Unterschiede in den entstandenen Gewebe abgeleitet.[283] Aus konservierungswissenschaftlicher Sicht ist bisher nicht systematisch untersucht worden, wie sich manuell und maschinell gewebte Flachsgewebe in ihrer Geometrie und Eigenschaften unterschei-

279 Koch 1955, S. 363.
280 Die Dokumentation historischer Leinwände ist ein Desiderat in der Konservierungswissenschaft, weshalb an dieser Stelle auf keine zusammenfassende Studie verwiesen werden kann. Exemplarische Datensammlungen finden sich bei Scheel 1992, Vanderlip de Carbonnel 1980 und Wufka 2004.
281 Bohnsack1981, S. 232.
282 Mecheels et al. 2009, S. 294.
283 Zenker 1998.

den. Es werden jedoch Unterschiede angenommen, die vor allem in Zusammenhang mit dem hygrischen Verhalten Erwähnung finden. So wird zuweilen angenommen, dass maschinell gewebte Leinwände durch Sorption von Feuchte ein besondern hohes Potential zum Schrumpfen haben.[284] Eine zweifelsfreie Zuordnung historischer Leinwände, auf welche Weise sie gewebt wurden, ist bisher nicht gelungen.
In Geweben weisen die Fäden eine gewisse Bogigkeit auf, um sich gegenseitig zu umschlingen. Kett- und Schussfäden sind häufig von unterschiedlicher Geometrie und Qualität. Aus diesem Grund sind Dimensionsänderungen des Gewebes in der Regel richtungsabhängig, also anisotrop. Die Kettfäden weisen häufig eine höhere Bogigkeit auf als die Schussfäden. Durch die höhere Länge sind sie dehnbarer und haben mehr Bewegungsmöglichkeiten. Aus diesem Grund wird häufig in Richtung der Kettfäden eine größere Dimensionsänderung beobachtet.[285]

3.5.2 Veredlung der Gewebe

Unter Textilveredlung ist die Gesamtheit der chemischen und physikalischen Bearbeitungen zusammengefasst, die Rohgewebe entsprechend ihrer Verwendung gebrauchsfertig machen. Dazu zählen im engen Sinne Bleichen, Appretieren, Färben und Bedrucken.[286] Gewebe ohne Nachbehandlung werden als Stuhlware oder Rohware bezeichnet.[287] Gebleichte Gewebe werden und wurden als Bildträger eingesetzt, weshalb das Verfahren an dieser Stelle erläutert wird. Die Bedeutung der Appretur in der historischen Bearbeitung der Gewebe, kann aufgrund der schlechten Forschungslage nur eingeschränkt eingeschätzt werden. Wie sich die entsprechenden Behandlungen der Gewebe nach dem Weben historisch entwickelt haben, wurde bisher wenig beleuchtet. Es ist möglich, dass die als Bildträger verwendeten historischen Gewebe als Rohware keiner weiteren Bearbeitung unterlagen. Für die Verwendung als Bildträger spielen das Färben und Bedrucken in der Regel keine Rolle, weshalb sie an dieser Stelle nicht weiter behandelt werden.

Bleichen

Gebleichte Gewebe werden und wurden als Bildträger verwendet. Makroskopisch können sie eindeutig als solche erkennbar sein, in anderen Fällen kann dies schwierig sein. Der analytische Nachweis von gebleichten Geweben ist nicht zweifelsfrei möglich.[288] Die mikroskopische Faseranalyse zur Identifikation von gebleichtem Flachs wurde in der Konservierungswissenschaft bisher nicht angewandt oder überprüft.[289]

284 Bilson 1996, S. 247; Berger 2000, S. 66.
285 U. a. Zenker 1998 und Schaible 1987S. 85.
286 Textillexikon, s. v. Textilveredlung.
287 Hofer 1994, S. 574.
288 Heydenreich et al. 2008.
289 Opitz 1940, S. 37—38.

Grundsätzlich kann Flachs als Garn oder Gewebe gebleicht werden. Die Vorgehensweisen unterscheiden sich nicht wesentlich.

Ziel des Bleichens ist das Entfärben oder Entfernen von chromophoren Verbindungen, in der Regel des Lignins., welches in geröstetem Flachs in Anteilen bis zu 2 % enthalten ist.[290] Grundsätzlich können die Chromophoren chemisch durch eine Oxidation oder Reduktion gebleicht werden. Historisch wurden die Gewebe durch Oxidation, durch die Einwirkung des Sonnenlichtes gebleicht. Die Betrachtungen in dieser Arbeit beschränken sich auf die oxidative Bleiche.

Sowohl historische als auch moderne Bleichvorgänge beinhalten vor dem eigentlichen Bleichen eine alkalische Behandlung des Fasermaterials, um natürliche, hydrophobe Verunreinigungen zu entfernen. Dadurch soll der im Anschluss folgende wässrige Bleichprozess durch eine erhöhte Feuchteaufnahme erleichtert werden.[291] Die Mittellamelle soll dabei jedoch nicht beschädigt werden, um den Zusammenhalt der technischen Fasern nicht zu schädigen.[292] Heydenreich et al. stellten jedoch durch den submikroskopischen Vergleich von gebleichten und ungebleichten Geweben fest, dass es in den gebleichten Geweben durchaus zu einer Schädigung der Mittellamelle gekommen ist. Tendenziell lagen dort mehr Fasern als Elementarfasern vor, als in den ungebleichten Geweben, in denen die Elementarfasern in gebündelter Form, als technische Fasern vorlagen.[293]

Die alkalische Vorbehandlung wird bei hohen Temperaturen und in moderner Zeit zusätzlich unter Druck durchgeführt. Das Kochen in Natronlauge lässt die Cellulose stark quellen. Dabei lagern sich die Moleküle der Lauge weniger stark geordnet als Wassermoleküle an die Celluloseketten, weshalb die Volumenszunahme größer ist als durch Wasser. Der Grad der Volumenszunahme hängt von der Konzentration der Lauge ab. Bei der Anwendung einer 10%igen Natronlauge kommt es zu einer intermizellaren Quellung, währen eine höher konzentrierte Lauge eine Quellung auch innerhalb der Micellen, also intramicellar, bewirkt. Werden durch die Lauge die Bindungen innerhalb der Micellen aufgebrochen, nehmen insgesamt die intermicellaren Bereiche zu, was im Fasermaterial im Anschluss eine erhöhte Sorptionsfähigkeit bewirkt.[294]

Das daran anschließende eigentliche Bleichen erfordert oxidierende Bleichmittel. Historisch war das oxidierende Bleichmittel atmosphärischer Sauerstoff (O_2), der durch das direkt einwirkende Sonnenlicht (UV) in sehr reaktiven atomaren Sauerstoff (O) übergeht.[295] Weil die Gewebe dafür auf dem Rasen ausgelegt wurden, spricht man von der Rasenbleiche, die jedoch nach 1945 industriell keine Rolle mehr spielt. Sie wurde durch die Peroxyd- und saure Chlorbleiche ersetzt. Die hauptsächlichen Verfahren der Chlorbleiche sind die alkalische oder saure Chlorbleiche und kombinierte Verfahren, die in den einzelnen Rundgängen und je nach dem

290 Batra 2007, S. 510.
291 Textillexikon, s. v. Leinengarnbleiche; Fakin et al. 2006; Heydenreich 2008.
292 Textillexikon, s. v. Leinengarnbleiche.
293 Heydenreich et al. 2008, S. 613.
294 Stöckigt 1990, S. 92.
295 Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 227—228.

gewünschten Bleichgrad verschieden arbeiten. Je nach Weißgrad spricht man von ¼-, ½-, ¾- und $^4/_4$-Bleiche, für dessen erreichen unterschiedlich viele Bäder im Bleichmittel durchgeführt werden.[296] Die Einschätzung dieses Weißgrades ist subjektiv und schwankt je nach Herkunft der Pflanzen.[297]

Kopczynski/Wlochowicz stellten fest, dass die alkalische Vorbehandlung zu einer Erhöhung der Kristallinität in Flachsfasern führt.[298] Gegenteiliges wurde von Fakin et al. nachgewiesen: Die alkalische Vorbehandlung führt zunächst zu einer leichten Abnahme der Kristallinität, einer Erhöhung der Zugänglichkeit der amorphen Bereiche und dadurch zu einer leichten Erhöhung der Sorption von Feuchte. Das Bleichen selbst hat gegenteilige Effekte: die Kristallinität steigt, die Zugänglichkeit in den amorphen Regionen sinkt und insgesamt wird die Sorptionsfähigkeit des Materials herabgesetzt. Demnach kann, je nach Intensität der Bleiche, die Sorptionsfähigkeit des Gewebes nach dem Bleichen dem Ausgangszustand entsprechen oder herabgesetzt sein.[299]

Konkrete Werte für die Sorption von gebleichtem Flachs sind nur vereinzelt publiziert. Howlett gibt einen Feuchtezuschlag von 7 % an (bei 25 °C / 65 %rF).[300] Scheithauer zeigt die Abnahme der Feuchteaufnahme mit der Dauer der Bleichbehandlung.[301] Für 20 °C und 65 %rF gibt er zusammenfassend für Flachsgarn einen Feuchtezuschlag von etwa 10 % und für gebleichten Flachs unter 9 % an. Die vollständigen Daten sind im Anhang wiedergegeben.[302] Nach Kind sinkt bei Flachs die Aufnahme von Feuchte während der Bleiche um 1—2 %.[303] Die konkrete Art des Bleichens wurde bei den einzelnen Autoren nicht benannt. Aus dem Zeitraum der genannten Publikationen lässt sich vermuten, dass es sich bei den Bleichmethoden nicht um die historische Rasenbleiche handelt. Demnach lägen keine Untersuchungen zur Auswirkung der Rasenbleiche vor.

Alle oxidierenden Bleichmittel wirken nicht selektiv, sondern können auch Cellulose und deren Begleitsubstanzen abbauen. Dadurch erfährt das Fasermaterial einen Gewichts- und Festigkeitsverlust, der mit der Dauer der Bleichbehandlung ansteigt. Er liegt bei Werggarnen höher, weil diese eine höhere Bleichbadkonzentration benötigen. Im Mittel wurden bei einer ¾-Bleiche Gewichtsverluste von 10—14 % und Reißkraftverluste von 14—20 % gemessen.[304] Weitere Messergebnisse zur Festigkeit in Abhängigkeit der Bleiche finden sich bei Kind.[305] Auch der DP der Cellulose nimmt durch das Bleichen deutlich ab.[306] Das Bleichen führt also zu einer

296 Ullmanns s. v. Bastfasern, S. 188; Textillexikon s. v. Leinengarnbleiche.
297 Kind 1930, S. 286.
298 Kopczyński/Wlochowicz 1966.
299 Fakin et al. 2006.
300 Howlett et al. 1942, S. T102.
301 Scheithauer 1941, S. 67.
302 Anhang A, Tab. A.2, S. 294.
303 Kind 1930, S. 283.
304 Ullmanns, s. v. Bastfasern, S. 188 und Textillexikon, s. v. Leinengarnbleiche.
305 Kind 1932, S. 323—325.
306 Siehe Tabelle 3.1, S. 44.

Minderung der Qualität des Gewebes, was für ästhetische Gesichtspunkte spricht, die für die Wahl eines gebleichten Bildträgers ausschlaggebend sein müssen.

Appretur

Die Nachbehandlung der Gewebe umfasst in der Regel unterschiedliche Wasch- und Trocknungsprozesse, die von Hand durchgeführt wurden, bis im 19. Jh. dafür Maschinen aufkamen. Historisch verwendete Zusätze beim Waschen waren Urin, natürliches Soda, Pottasche, Seifenkraut und andere. Seife kam im 17. Jh. dafür in Verwendung.[307] In modernerer Zeit können dem Wasser verschiedene Netzmittel und Tenside zugesetzt sein.[308]
Über die dem Waschen nachfolgenden Trocknungsverfahren der Gewebe existieren in Bezug auf die historische Durchführung keine Informationen in den ausgewerteten Überblicksarbeiten. Einzelne Quellenschriften wurden diesbezüglich nicht ausgewertet. Insofern beschränkt sich die Darstellung auf moderne Verfahren.
Vor dem Trocknen wird in der Regel in einem ersten Schritt freies Wasser durch Schleudern oder Abquetschen zwischen Walzen entfernt. Die anschließende Trocknung erfolgt entweder in erwärmter Luft oder im überhitztem Dampf. Beim Trocknen in erwärmter Luft soll das Material nicht übertrocknet werden, d. h. es soll eine Mindestfeuchtigkeit behalten, die ungefähr dem Feuchtigkeitsgehalt entspricht, den Fasern im Normalklima bei 20 °C und 65 %rF aufnehmen. Für Flachs wurde dieser Feuchtezuschlag mit 12 % festgelegt.[309] Wird diese Empfehlung nicht eingehalten, kann sich die Sorptionsfähigkeit des Materials irreversibel verändern.[310] Während des Trocknens können die Gewebebahnen auf Spannrahmen aufgespannt sein, um die durch das Weben verursachte Längsdehnung des Gewebes auszugleichen. Dabei werden die Gewebe in die Breite gestreckt, wobei auch ein Überstrecken möglich ist. Spannrahmentrockner haben einen wesentlichen Anteil an der Regulierung der Restkrumpfung des Gewebes.[311] Gewebe können auch im nicht gespannten Zustand getrocknet werden. In unterschiedlichen Anordnung und Aufhängungen wirkt dabei maximal ihr Eigengewicht.[312]
Flachsgewebe werden in der Regel bei Temperaturen unterhalb 70 °C auf Spannrahmen- oder Hängetrocknern getrocknet.[313]

Auch beim Sengen besteht die Möglichkeit, dass die Fasern eine starke Trocknung durch Hitzeeinwirkung erfahren. Durch Flammen oder erhitzte Körper sollen abstehende Faserenden

307 Mecheels et al. 2009, S. 515 und 519.
308 Bernard 1967, S. 40—51.
309 Bernard 1967, S. 97—105.
310 Siehe auch Abschnitt „Begriffsdefinitionen und Grundlagen des hygrischen Verhaltens der Leinwand„ S. 37ff.
311 Bernard 1967, S. 112, 115.
312 Bernard 1967, S. 126.
313 Bernard 1967, S. 139.

entfernt werden. Dieser Arbeitsschritt kann auch am Garn erfolgen.[314] Man geht davon aus, dass das Sengen Mitte des 18. Jhs. aufkam.[315]

Mangeln, Kalandern, Pressen und Dekatieren haben den Zweck, abstehende Fasern an die Gewebeoberfläche anzudrücken.[316] Mangeln und Kalander bestehen im Prinzip aus geheizten Druck- und ungeheitzen elastischen Walzen. Beim Mangeln wird das Gewebe in Lagen längere Zeit von den rotierenden Druckwalzen (80 °C) bearbeitet, beim Kalandern wird das Gewebe nur durch diese Walzen hindurchgeführt. Dadurch soll der Glanz und die Oberflächenerscheinung beeinflusst werden. Weil das Mangeln relativ viel Zeit in Anspruch nimmt wird es nur für hochwertige Leinenwaren angewendet.
Die Walzentemperatur beim Kalandern kann bis zu 300 °C betragen.[317]

Das Dekatieren kommt hauptsächlich für die Behandlung von Wolle vor. Es soll vor allem eine Krumpfechtheit entstehen, wodurch das Material nachträglich nicht mehr einläuft. Zielführend ist hierbei hauptsächlich das spannungsfreie Trocknen.[318]

Zum Krumpfen zählen mechanische Arbeitsschritte, die zur Reduktion des Restkrumpfes führen, z. B. das Sanforisieren und Monforisiseren. Statt dem Begriff Krumpfen wird auch vom Einlaufen oder Einspringen gesprochen. Die Ursache des Krumpfens liegt in der Verkleinerung der Gewebe aufgrund von Quellung der Fasern und Garne im Querschnitt. Diese Schrumpfung im Gewebe ist richtungsabhängig. Die Garne werden beim Verarbeiten in allen Fällen nur in Längsrichtung gespannt und passen sich im trockenen Zustand dieser Verstreckung an. Bei der Verarbeitung des Gewebes wird es immer in Kettrichtung gespannt, das Garn hat dadurch nie die Gelegenheit eine krumpffreie Lage einzunehmen, außer beim Trocknen auf dem Spannrahmen, was jedoch nicht ausreicht, um ein Auskrumpfen zu erreichen. Insofern wird der Einsprung oder das Krumpfen nach der Herstellung des Gewebes stärker in Richtung der Kettfäden ausfallen. Um das Krumpfen des fertigen Gewebes zu verhindern, wird den Geweben schon während der Veredlung die Gelegenheit gegeben, einen gewissen Schrumpf auszuüben. Das dafür durchgeführte mechanische Krumpfverfahren ist das Sanforisieren, nach dessen Anwendung das Gewebe höchstens 1 % einspringen soll. Gewebe werden in feuchtem, erwärmten Zustand zusammengestaucht und werden in dieser spannungsarmen Lagen fixiert.[319] Ob und in welchem Maß ein Gewebe diesen Krumpfprozess erfahren hat, ist für sein späteres hygrisches Verhalten von Relevanz, weil es darauf Einfluss nimmt, in welchem Maß sich das Gewebe bei Wasserkontakt verkleinert.

314 Bernard 1967, S. 29—30.
315 Mecheels et al. 2009, S. 525.
316 Bernard 1967, S. 29.
317 Bernard 1967, S. 181—182, 185.
318 Bernard 1967, S. 201. Zum Dekatieren in der restauratorischen Praxis siehe auch Abschnitt „Kontakt mit flüssigem Wasser / Dekatieren„ S. 100.
319 Bernard 1967, S. 212—215.

Es ist liegen bisher keine Erkenntnisse vor, welche Verarbeitungsschritte historisch an Geweben durchgeführt wurden, die als Bildträger eines Leinwandgemäldes Verwendung fanden.

3.5.3 Sorption von Feuchte im Gewebe

Für die Beschreibung der Sorption von Feuchte werden Textilien häufig als kapillarposöser Körper betrachtet, bei dem die Hohlraumstruktur entscheidend zur Aufnahme von Feuchte, vor allem in den hohen Bereichen der Umgebungsfeuchte beiträgt. Aus diesem Grund sind Quellungswerte von Elementarfasern oder technischen Fasern und des Garns nicht auf ein Gewebe übertragbar. Es ist des Weiteren relevant, dass sich diese Hohlräume während der Quellung weiten und verändern können, sodass es in der Praxis schwer ist, exakte Werte für die maximale Aufnahme von Feuchte bei 100 %rF anzugeben. Die Charakterisierung der Zwischenräume eines Gewebes kann über die Werte der Dicke und der Fläche des Gewebes erfolgen. Durch das auf diese Weise ermittelte Volumen kann mit der Masse auf die Rohdichte und den Porenanteil geschlossen werden.[320] In Zusammenhang mit dem hygrischen Verhalten hat sich diese Erfassung bisher nicht durchgesetzt. Es ist eher üblich, über den Verlauf der Sorptionsisotherme auf den Charakter des porösen Körpers zu schließen. In der Konservierungswissenschaft sind keine Beschreibungen der Leinwand hinsichtlich ihrer Porenstruktur bekannt. An originalen Bildträgern ist dies technisch bisher nicht möglich und im Zusammenhang von Untersuchungen an neuen Geweben wurde es bisher auch nicht durchgeführt.

Insgesamt existieren kaum Daten, wie viel Feuchte von einem Gewebe aufgenommen werden kann. Allgemeine Sorptionsdaten für Flachs werden in der Regel an den Fasern oder Garnen erfasst. Wie der Sorptionsisotherme von Flachs zu entnehmen ist (Abb. 3.13, S. 78), nimmt die Gleichgewichtsfeuchte in den hohen Bereichen der rF sprunghaft zu. Dieser Bereich wird durch flüssiges Wasser in den auf allen Ebenen des Gewebes vorhandenen Zwischenräumen bestimmt. Über das Wasserrückhaltevermögen, das für Flachs zwischen 40 % und 64 % angegeben wird (siehe S. 76), lässt sich erkennen, dass flüssiges Wasser in viel größeren Mengen aufgenommen werden kann als die höchsten Werte über die Aufnahme von Wasserdampf (siehe Tab. 3.11, S. 72).
Quantitative Beziehungen zwischen der Gleichgewichtsfeuchte, der Dimensionsänderung des Gewebes und Daten der Gewebegeometrie wurden bereits von Abbott et al. als Desiderat aufgezeigt.[321] Seitdem sind dazu jedoch keine weiteren Erkenntnisse publiziert worden. Zwei unpublizierte Seminararbeiten an der HfBK Dresden beschäftigten sich mit dem Zusammenhang zwischen Gleichgewichtsfeuchte und Gewebegeometrie.[322] Sorptionsisothermen eines locker und eines dicht gewebten Flachsgewebes wurden verglichen. Beide Gewebe zeigten eine Über-

320 Reumann 2000c, S. 383.
321 Abbott et al. 1964.
322 Dick 2006; Bennke 2007.

einstimmung der Gleichgewichtsfeuchte bis zu einer rF von 83 %rF. Bei höheren Werten der rF nahm das dicht gewebte Gewebe mehr Feuchte auf als das locker gewebte Gewebe. Der Feuchtezuschlag lag bei einer rF von 96 % für das lockere Gewebe bei 20,63 % und für das dichte Gewebe bei 24,1 %.[323] Die Ursache liegt möglicherweise darin, dass in dichten Geweben mehr Fasermaterial pro Volumeneinheit zur Verfügung steht, um Feuchte zu binden. Die Studie greift eine wichtige Fragestellung auf, die es zu vertiefen lohnt.
Andersen zitiert in ihrer Studie über die Gewebeherstellung in Dänemark eine Quelle des 19. Jhs., die besagt, dass maschinell produzierte Gewebe 30 % mehr Feuchte aufnehmen können als die handgefertigten.[324] Vor dem Hintergrund des bisher gesagten, erscheint diese Aussage etwas pauschal, eine Begründung bleibt aus. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit konnte diesem Aspekt jedoch nicht weiter nachgegangen werden. Es wäre aber durchaus lohnenswert, die Unterschiede zwischen manuell und maschinell gewebten Leinwänden zu untersuchen.
Die wenigen Daten lassen an dieser Stelle keine allgemeinen Schlüsse zur Menge der aufgenommenen Feuchte in Bezug auf Gewebe unterschiedlicher Geometrie zu.

3.5.4 Geschwindigkeit von Sorption und Desorption

Wie lange es dauert, den Gleichgewichtszustand sowohl bei der Sorption als auch bei der Desorption zu erreichen, wurde bisher selten untersucht. Dabei stellt dieses Wissen einen zentralen Baustein dar, um Feuchte kontrolliert am Bildträger einsetzen zu können.
Die Geschwindigkeit von Sorptions- und Desorptionsvorgängen ist von vielen Faktoren abhängig. Bezüglich des Gewebes selbst spielen u. a. die Faserart, das Flächengewicht, die Fadenzahl eine Rolle. Darüber hinaus sind es äußere Faktoren wie Temperatur, Luftfeuchte und Luftbewegung.[325] Auch die Art des experimentellen Aufbaus, während der Untersuchung von Sorptionsvorgängen entscheidet über die Geschwindigkeit des Prozesses. Dies ist möglicherweise ein Grund, warum nur wenige kinetische Untersuchungen zur Wasserdampfsorption allgemeingültige Aussagen enthalten.[326] Bobeth gibt für die experimentelle Praxis an, dass die Gleichgewichtsfeuchte für aufgelockerte Faserproben durch Sorption, nach 12 Stunden erreicht ist. Bei Geweben kann es zwischen 24 und 72 Stunden dauern.[327] Die Angaben beziehen sich nicht auf eine konkrete Faserart, sondern stellen eher einen allgemeinen Richtwert dar.
Nach Fuzek brauchen Baumwollfasern 1,5 Stunden für die Sorption und 99 Tage für die Desorption um den Gleichgewichtszustand bei 21 °C und 65 %rF zu erreichen.[328] Es ist davon auszugehen, dass auch bei Flachs ein deutlicher Unterschied zwischen Sorption und Desorption zu beobachten ist.

323 Bennke 2007, S. 35 und 37.
324 Andersen et al. 2009, S. 41.
325 Crank 1960, S. 85—86.
326 Gál 1967, S. 114.
327 Bobeth 1993, S. 235.
328 Fuzek 1985, S. 143.

Konkrete Angaben zu Flachs können an dieser Stelle nur anhand von einer publizierten Untersuchung von Satlow in Bezug auf die Trocknungsdauer von Garnen gemacht werden.[329] Daraus geht hervor, dass sich bei steigender Temperatur und geringerer rF die Trocknungszeit verkürzt (siehe Tab. 3.14). Bei diesen Daten ist zu berücksichtigen, dass es sich nicht um eine vollständige Trocknung handelt, die nur bei einer rF von 0 % erreicht wird. Die Messungen zeigten einheitlich, dass Flachgarn aus Werg langsamer trocknet, als ein Garn aus Langfasern.
Die jeweilige Restfeuchte ist ebenfalls angegeben, aus der Publikation geht jedoch nicht hervor, wie der Begriff der Restfeuchte mathematisch definiert ist.

Die genannten Ergebnisse beschreiben jeweils den Zeitraum für das vollständige Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte. Wie schnell demgegenüber eine Leinwand auf Kurzzeitschwankungen reagiert, wurde bisher erstmals von Holl untersucht.[330] Dabei wurden Masseänderungen aufgrund unterschiedliche Schwankungsraten von zehnminütigen und zweistündigen Wechseln aufgezeichnet. Es zeigte sich, dass Leinwände unmittelbar auf wechselnde Umgebungsfeuchten reagieren. Die größte Masseänderung findet während der Anfangszeit statt.
Für eine kontrollierte Anwendung von Feuchte an der Leinwand, die auch in Kombination mit Wärme eingesetzt wird, ist es eine notwendige Voraussetzung, mehr über die Geschwindigkeit von Sorption und Desorption des Fasermaterials zu wissen. Für die restauratorische Praxis gibt es keinerlei Anhaltspunkte, wann die Leinwand ihre Gleichgewichtsfeuchte erreicht hat. Dies gilt für Sorption und Desorption gleichermaßen.

Tabelle 3.14: Trocknungsdauer und Restfeuchte von Garn aus Flachs und Flachswerg nach Trocknung unter verschiedenen Bedingungen. Aus Satlow 1951, S. 625.

Relative Feuchte [%]	**Temperatur [°C]**	**Luftgeschwindigkeit [m/s]**	**Trocknungszeit [Min]**		**Restfeuchte [%]**	
			Flachs als Garn	**Flachswerg als Garn**	**Flachs als Garn**	**Flachswerg als Garn**
30	30	5	212	248	6,1	7,3
30	60	5	79	118	4,8	4,2
30	90	5	51	93	2,8	2,5
60	30	5	222	230	9,9	10,4
60	60	5	145	205	7,6	7,2
60	90	5	182	152	4,5	4,6
90	60	5	358	410	14,7	19,2
60	60	4	138	290	8,1	7,0
60	60	6	123	191	7,8	6,2

329 Satlow 1951, S. 625.
330 Holl 2016, S. 43 ff.

Insgesamt ist der Wissenstand über das Desorptionsverhalten von Flachsfasern, -garnen und -geweben gering. Es existieren kaum publizierte Werte, wie stark Flachsgarne oder -gewebe durch erhöhte Temperaturen trocknen. Häufig werden Ergebnisse von Baumwollfasern oder reiner Cellulose auf Flachs übertragen. Dies ist jedoch aufgrund der spezifischen Einflüsse der Flachsfaser auf das hygrische Verhalten ungeeignet. Insgesamt ist es deshalb unmöglich, das Trocknungsverhalten von Leinwänden in Hinblick auf Konservierungsmaßnahmen zu beurteilen. Vor allem auch in Hinblick auf Maßnahmen, die höhere Temperaturen unter Abwesenheit von Feuchte beinhalten, z. B. Verklebungen der Leinwand partiell als Anränderung oder auch ganzflächig auf dem Heiztisch während einer Doublierung, herrscht in der Praxis völlige Unkenntnis über das Maß und die Geschwindigkeit der Trocknung der Leinwand und deren Folgen. Für die Einschätzung der jeweiligen Auswirkungen der Trocknung ist an dieser Stelle dringender Forschungsbedarf festzustellen.

3.5.5 Dimensionsänderungen des Gewebes

In der Textiltechnik werden drei Arten der Dimensionsänderungen aufgrund von Sorption und Desorption unterschieden.[331]

- Die hygrale Expansion.
- Der Quellungsschrumpf.
- Der irreversible Relaxationsschrumpf.

Für den Relaxationsschrumpf sind die in den Garnen und Geweben vorhandenen, latenten inneren Spannungen aus dem Fertigungsprozess verantwortlich. Durch ein Benässen werden diese, meist Zugspannungen, gelöst, was zu einem einmaligen und bleibenden Schrumpf führt.[332] Nach Ballard kann ein Gewebe dadurch bis zu 15 % kleiner werden.[333] Bei einer historischen Leinwand, die bereits mehrmals mit Feuchte in Kontakt getreten ist, ist in der Regel nicht damit zu rechnen, dass diese Art des Schrumpfens auftritt. Denkbar ist es jedoch für sehr junge Leinwände, die ohne jegliche wässrige Vorbehandlungen maltechnisch verarbeitet wurden.
Als hygrale Expansion werden in der Textiltechnik reversible Vergrößerungen als auch Verkürzungen des Gewebes bezeichnet. Dabei vergrößert sich das Gewebe durch Sorption und Verkleinert sich durch Desorption. Vor allem wird damit das Verhalten von Wolle beschrieben, es gilt jedoch auch für Flachsgewebe. Die Ursache der Ausdehnung bei Befeuchtung liegt in der Breitenquellung der Garne. Der Garndurchmesser vergrößert sich, infolge dessen das Garn das Bestreben hat, zu einem spannungsärmeren gestreckten Zustand zu kommen, was durch

331 Thomas et al. 2000, S. 537.
332 Thomas et al. 2000, S. 537 und Bobeth 1993, S. 242—243.
333 Ballard 1996, S. 667.

ein Aufweiten der Bogigkeit des Garns erreicht wird. Das Garn wird flacher und dadurch länger.[334] Bei dieser modellhaften Betrachtung werden jedoch die Reibungskräfte außer Acht gelassen, die von den senkrecht verlaufenden Fäden der anderen Webrichtung ausgehen. Erst bei relativ hohen Umgebungsfeuchten treten durch die Quellung der Garne an den Bindungspunkten Klemmungen auf, sodass die Bogigkeit der Fäden zunimmt und das Gewebe in Folge schrumpft. An diesem Punkt wird die hygrale Expansion vom Quellungsschrumpf überlagert. Dabei wird das Aufbiegen der Garnbögen durch die mit zunehmender Quellung der Fasern im Garn stärkere Pressung von Kett- und Schussgarn aneinander in den Einbindungspunkten des Gewebes behindert. Das Gewebe schrumpft.[335] Dieser Quellungsschrumpf wurde aus textiltechnischer Sicht von Collins beschrieben.[336] Die Fäden sind durch die Bindungspunkte im Gewebeverbund fixiert und können aufgrund der hohen Reibung nicht aneinander vorbei gleiten. Daher hat die Vergrößerung ihres Querschnitts eine stärkere Umschlingung der Fäden zur Folge, wodurch sie einen längeren Weg zurück legen und enger aneinander rücken (Abb. 3.15). Die Bindungsart nimmt durch die Anzahl ihrer Bindungspunkte darauf Einfluss. Die Leinwandbindung, mit der maximalen Anzahl an Bindungspunkten, hat daher ein vergleichsweise hohes Potential zu schrumpfen.

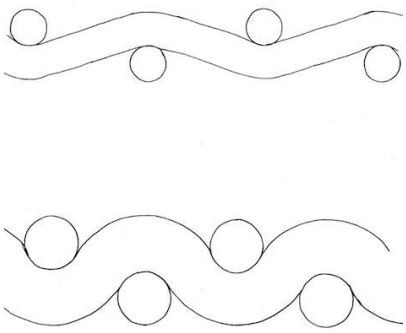


Abbildung 3.15: Verkürzung des Gewebes aufgrund der Breitenquellung des Garns.
In Anlehnung an Collins 1939.

Zusätzlich zu den drei genannten Arten der Dimensionsänderungen beschreibt Abbott eine vierte Theorie der Gewebevergrößerung. Er beobachtete an Viskosefasern während der Sorption eine kurzzeitige Vergrößerung des Gewebes gefolgt von einer anschließenden Schrumpfung. Seine Erklärung für die anfängliche Vergrößerung liegt in der Längsquellung der Fasern, wodurch sich das Garn verlängert. Sobald die Breitenquellung alle Zwischenräume gefüllt hat, setzt etwas zeitverzögert der Quellungsschrumpf des Gewebes ein.[337] Dieses Modell wurde auch in der Konservierungswissenschaftlichen Literatur übernommen.[338] Es scheint nicht

334 Thomas et al. 2000, S. 547—548; Dittrich/Reumann 1996, S. 38.
335 Thomas et al. 2000, S. 549.
336 Collins 1939, S. P50—P53.
337 Abbott et al. 1964, S. T112—113.
338 Bilson 1996, S. 246—247; Young 1996, S. 120.

wahrscheinlich, dass dieser Mechanismus auf Flachsfasern zutrifft, deren maximale Längsquellung bei 0,2 % liegt.[339]

Darüber, wann die genannten Arten des Ausdehnens und Verkürzens in der Leinwand auftreten, gibt es unterschiedliche Beobachtungen.
Allgemein sind wenig Ergebnisse zu Dimensionsänderungen an ungespannten Flachsgeweben publiziert. In der Konservierungswissenschaft werden in der Regel Versuchsanordnungen gewählt, bei welchen die Gewebe auf unterschiedliche Weise gespannt oder fixiert waren. Bilson zeigte an einem ungespannten Gewebe, dass sich Dimensionsänderungen erst ab einer Umgebungsfeuchte von 60 %rF zeigten, wo das Gewebebegann zu schrumpfen. Durch die gleichzeitige Messung der Garnzwischenräume im Gewebe, war ersichtlich, dass diese kontinuierlich mit der Erhöhung der Umgebungsfeuchte abnahmen, obwohl es sich noch nicht in einer Dimensionsänderung des Gewebes bemerkbar machte.[340] Im Rahmen einer unpublizierten Diplomarbeit wurden ebenfalls Daten an ungespannten Geweben erfasst.[341] Die durch Quellung entstandenen Verkleinerungen an fünf unterschiedlichen Geweben sind in Tabelle 3.15 zusammengefasst. Dieselben Gewebe, die vor diesen Messungen gewaschen wurden, zeigten gegenteiliges Verhalten: sie dehnten sich durch Befeuchtung aus und schrumpften erst durch eine erneute vollständige Durchnässung.[342] Im Sinne der oben aufgeführten textiltechnischen Einteilung trifft auf das gewaschene Gewebe das Prinzip der hygralen Expansion zu, mit der vollständigen Benässung dominiert dann der Quellungsschrumpf. Das Schrumpfen des ungewaschenen Gewebes während der Sorption kann als Relaxationsschrumpf gedeutet werden.

Tabelle 3.15: Dimensionsänderungen von ungespannten Flachsgeweben in Kettrichtung, Daten aus Mager 2007, S. 188—197.

+ = Vergrößerung, - = Verkleinerung

Dimensionsänderung unterschiedlicher Leinwände ungewaschen [%]					
Die Größenänderungen beziehen sich auf die Größe der Leinwand nach 4stündigen Trocknung bei 105 °C.					
rF 82 %	- 1,12	- 0,1	- 1,69	- 1,70	- 0,61
Durchnässen	- 6,55	- 3,92	- 8,93	- 7,11	- 6,28
Dimensionsänderung unterschiedlicher Leinwände gewaschen [%]					
Für rF 82 % bezieht sich die Größenänderung auf die Größe der Leinwand nach 4stündigen Trocknung bei 105 °C, für die durchnässten Proben bezieht sie sich auf die Größe bei rF 82 %.					
rF 82 %	+ 3,11	+ 3,97	+ 5,01	+ 4,11	+ 5,68
Durchnässen	- 1,84	- 1,33	- 3,25	- 0,5	- 1,38

339 Siehe S. 56.
340 Bilson 1996, S. 249—250.
341 Mager 2007.
342 Mager 2007, S. 77—78.

Das Ausmaß der jeweiligen Größenänderung hängt direkt mit dem Quellungspotential des Garnes zusammen. Wie oben erwähnt, hat die Dichte und die Stärke der Verdrehung des Garns Auswirkungen auf das Ausmaß seiner Dimensionsänderung. Das gleiche gilt für Gewebe: dicht gewebte Gewebe zeigen eine größere Dimensionsänderung aufgrund von Quellung, als Gewebe, die ein gewisses Maß an Garnzwischenräumen aufweisen. Weisen die Fäden des Gewebes Unterschiede in ihrer Geometrie auf, kann das Ausmaß der Verkürzung je nach Webrichtung unterschiedlich ausfallen.[343] Dazu zählt u. a. die Bogigkeit des Garns im Gewebe, welche in der Konservierungswissenschaft auch als Garnkräuselung bezeichnet werden.[344] Man geht davon aus, dass Garne und Gewebe durch die maschinelle Produktion deutlich dichter und fester gesponnen und gewebt werden, als in der manuellen Produktion. Dadurch sollen sie generell ein höheres Schrumpfpotential aufweisen. Ein Beleg wurde dafür bisher nicht erbracht.

Auf den Unterschied zwischen dem Einwirken von Feuchte in Form von Wasserdampf und flüssigem Wasser wird in der Konservierungswissenschaftlichen Literatur immer wieder hingewiesen.[345] Das Ausmaß des Gewebeschrumpfes bei der Aufnahme von flüssigem Wasser übersteigt deutlich das Maß welches durch sehr hohe rF erreicht wird und wird oft erst dann überhaupt makroskopisch wahrgenommen (siehe auch Tab. 3.15).[346] Dem Restaurator ist dieses Ausmaß bekannt durch den sogenannten Wasserschaden, bei dem sich unter Einwirken von flüssigem Wasser die Leinwand so schnell und stark zusammen zieht, dass die darauf befindlichen Grundierungs- und Malschichten die Haftung verlieren.[347] Weil jedoch kaum Untersuchungen vorliegen, die den Unterschied der Wirkung von Wasserdampf und flüssigem Wasser gezielt beleuchten, können die Auswirkungen auf die Dimensionsänderungen der Leinwand an dieser Stelle nicht umfassend bewertet werden. Eine Schwierigkeit dabei ist das Erkennen, wann neben den Wasserdampfmolekülen auch flüssiges Wasser im Gewebe vorhanden ist. Lipinski diskutiert diese Frage.[348] Er wies darauf hin, dass es bei sehr hohen Werten der rF zur Kondensation des Wasserdampfes kommen kann, wodurch flüssiges Wasser in der Leinwand vorhanden ist, obwohl nur Wasserdampf von außen eingeführt wurde. Die Schwierigkeit liegt im Erkennen der unterschiedlichen Formen der Wassermoleküle. Zusätzlich kommt bei sehr hohen Werten der rF erschwerend hinzu, dass die Messgenauigkeit der Luftfeuchte an seine Grenzen kommt. Mit hoher Genauigkeit kann die rF bis 95 % erfasst werden. Es ist kein Messverfahren bekannt, welches höhere Werte präzise erfassen kann.[349]

343 Zenker 1998.
344 Kleinhansl 2000b, S. 298.
345 Schaible 1987, S. 86—87; Lipinski, S. 86.
346 Lipinski, S. 73—74.
347 Hedley et al. 1990.
348 Lipinski, S. 40—41.
349 Neue et al. 1997, S. 236.

3.5.6 Feuchteeinfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Gewebes

Einige mechanischen Eigenschaften des Gewebes verändern sich in Abhängigkeit von ihrer Gleichgewichtsfeuchte. Für die Beurteilung dieser Eigenschaften sind die Kennwerte der technischen Fasern nicht unbedingt aussagekräftig, weil im Gewebe die jeweilige Geometrie von Garn und Gewebe einflussgebend sein kann. Eine Tendenz kann jedoch gegeben sein. So nehmen Festigkeit und Dehnung der technischen Flachsfaser im nassen Zustand zu.[350] Im Garn und Gewebe nimmt die Festigkeit mit steigender Quellung ebenfalls zu. Der Grund ist die ausgeprägte Breitenquellung der Fasern, wodurch Fasern, Garn und Gewebe fest aneinander gepresst werden. Sie setzen dadurch äußeren Kräften einen höheren Widerstand entgegen.[351] Das wird auch deutlich an den steigenden Werten für den Elastizitätsmodul von Flachsgeweben bei steigender Umgebungsfeuchte sowohl in Kett- als auch in Schussfadenrichtung.[352] In welchem Maß die Festigkeit mit steigender Umgebungsfeuchte zunimmt, zeigte Mecklenburg für Flachsgewebe in Kett- und Schussrichtung (Abb. 3.16, 3.17). In Richtung der Kettfäden nahm die Festigkeit mit steigender Umgebungsfeuchte zu. In Richtung der Schussfäden galt der gleiche Zusammenhang. Eine Ausnahme war bei einer rF von 93 % erkennbar (Abb. 3.17). Eigentlich sollte hier die Festigkeit am höchsten sein. Mecklenburg führte es auf das aneinander vorbei gleiten der Fasern bei sehr hohen Feuchten zurück. Warum dieser Effekt nur in Richtung der Schussfäden auftritt, wurde nicht erklärt.[353] Die Breitenquellung der Fasern hat zur Folge, dass sich die Dehnbarkeit von Flachsgeweben mit steigender Umgebungsfeuchte verringert.[354]

Anderen Quellen zufolge kann Feuchte in Textilien wie ein Weichmacher aufgefasst werden, denn bei vollständiger Abwesenheit ist das Fasermaterial extrem spröde. Feuchte flexibilisiert das Material also. Bei sehr hohen Gleichgewichtsfeuchten zeigen Faserstoffe visko-elastisches Verhalten. Die Glasübergangstemperatur wird mit steigender Gleichgewichtsfeuchte herabgesetzt. Zusätzliche Wärme verstärkt die Effekte.[355]

350 Schenek 2000 s. v. Flachs, S. 90.
351 Bobeth 1993, S. 243—245.
352 Mecklenburg/Tumosa 1991a, S. 167.
353 Mecklenburg, S. 10 und Fig. 10a und 10b.
354 Läuchli 2004, S. 31.
355 Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 276—277.

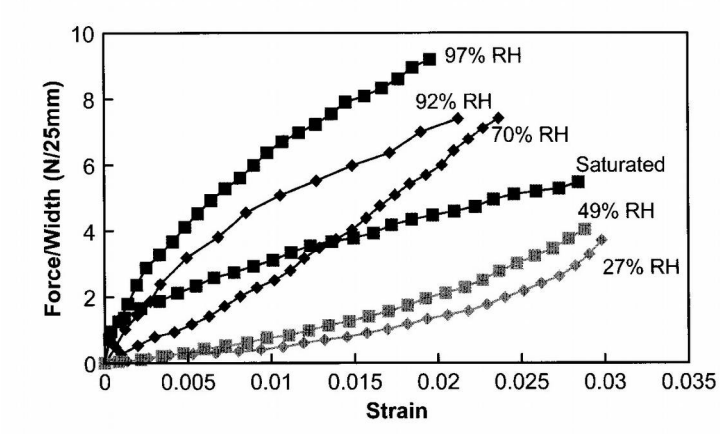


Abbildung 3.16: Kraft-Dehnungs Diagramm von Flachsgewebe in Kettrichtung aus Mecklenburg 2005, S. 133.

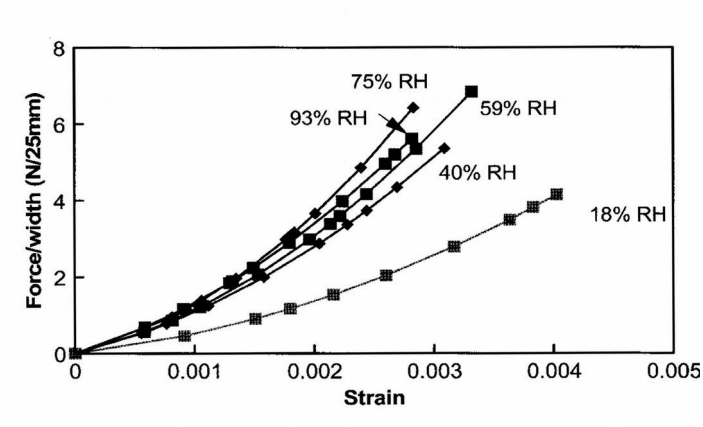


Abbildung 3.17: Kraft-Dehnungs Diagramm von Flachsgewebe in Schussrichtung aus Mecklenburg 2005, S. 134.

3.5.7 Zusammenfassung

Es existieren kaum Daten über die Feuchteaufnahme von Flachsgeweben. Sorptionsisothermen wurden bisher, soweit die Informationen dazu vorliegen, in der Regel an technischen Fasern oder Garnen erstellt. Mit dem Verweben der Garne zu einem Gewebe kommen weitere Zwischenräume hinzu, die für die Aufnahme von Feuchte eine Rolle spielen können. Ob unter diesem Aspekt Sorptionsisothermen der technischen Faser auf Gewebe übertragen werden können, ist noch zu klären. Ein Vergleich von Sorptionsisothermen von Garn und Gewebe wäre hier aufschlussreich.

Ebensowenig wie die Menge der aufgenommenen Feuchte ist das Ausmaß der daraus resultierenden Größenänderung der Gewebe untersucht. Unklar ist, wann und in welchem Maß hygrale Expansion, Quellungsschrumpf und Relaxationsschrumpf auftreten. Während die Erklärungsmodelle für das Schrumpfen eines Gewebes durch Sorption klar und nachvollziehbar sind, sind die Erklärungen, warum sich ein Gewebe durch Sorption ausdehnt, weniger klar.

Allgemein scheint im Übergang von Wasserdampfmolekülen zu flüssigem Wasser ein besonders interessantes Untersuchungsfeld unbearbeitet zu sein. Vor allem gilt es den Zusammen-

hang zwischen geometrischen Merkmalen, der Aufnahme von Feuchte und den daraus resultierenden Dimensionsänderungen der Gewebe herstellen.

Im Allgemeinen geht man davon aus, dass eine hohe Gewebefüllung und Fäden im Gewebe mit hoher Verdrehung ein hohes Schrumpfpotential durch Wasserkontakt aufweisen. Diese Tatsache hat in der Konservierungswissenschaft zu der Theorie geführt, dass mit der Einführung der maschinellen Garn- und Gewebeproduktion, wodurch dichtere und festere Garne und Gewebe entstanden, ein höheres Schrumpfpotential in den Geweben vorhanden ist.[356] Andersen kommt durch eine Studie zur historischen Entwicklung der dänischen Spinn- und Weberei zu dem Schluss, dass das maschinelle Weben für das besondere Verhalten von Leinwandgemälden des 19. Jhs. nicht in Frage kommt. Das Aufkommen der maschinell betriebenen Webstühle setzte sich in Dänemark erst Ende des 19. Jhs. durch.[357] Tatsächlich existieren jedoch kaum Untersuchungen, die die Gewebegeometrie mit objektiven Kriterien, die über „locker" und „dicht" hinaus gehen, dokumentieren. Auch wurden bisher keine Studien mit direkten Vergleich von manuell und maschinell produzierten Geweben durchgeführt, um diesen Einfluss zu untersuchen. Eine zweifelsfreie Zuordnung von historischen Leinwänden hinsichtlicher ihrer Produktionsart ist bisher nicht möglich.

Die Auswirkungen der Veredlungsprozesse auf das hygrisches Verhalten der Gewebe war bisher nur vereinzelt oder indirekt Gegenstand der Forschung. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass vor allem die wässrigen Behandlungen, teilweise in Kombination mit hohen Temperaturen und auch die mechanischen Beanspruchungen einflussgebend sind. Urquhart stellt fest, dass die üblichen textiltechnischen Verarbeitungsprozesse nur einen sehr kleinen Einfluss auf das hygrische Verhalten von Textilien haben und im Falle von Baumwolle wahrscheinlich innerhalb der Fehlergrenzen der Erfassung des Sorptionsverhaltens liegen. Davon ausgenommen sind Verarbeitungsschritte, die mit einer starken Quellung des Materials einhergehen, wie z. B. das Mercerisieren der Baumwolle, die eine starke Quellung des Fasermaterials in Laugen umfasst.[358] Im Falle von Flachs ist das Mercerisieren unüblich, dennoch können auch Flachsfasern Behandlungen unterzogen werden, die mit einer Quellung in Alkalien einhergehen, wie beim Kochen in Natronlauge als vorbereitende Maßnahme für das Bleichen.[359]

Unklar bleibt, welche Bearbeitungsschritte der Appretur historisch durchgeführt wurden und an der historischen Leinwand zu erwarten sind.

Die im einzelnen vorgestellten Forschungsergebnisse fügen sich derzeit nicht zu einem eindeutigen Erklärungsmodell zusammen, wie sich ein Gewebe aufgrund wechselnder Umgebungsfeuchten verhält.

356 Hedley et al. 1990, S. 119; Bilson 1996, S. 247.
357 Andersen et al. 2009, S. 45.
358 Urquhart 1960, S. 25.
359 Siehe Abschnitt Bleichen, S. 80.

3.6 Leinwand

Um als Bildträger eines Leinwandgemäldes zu fungieren, folgen am Gewebe in der Regel die folgenden Verarbeitungsschritte: die Aufspannung, die Vorleimung, die Grundierung und der Auftrag der Farbschicht. Über die Behandlung der Leinwand vor dem Auftrag von Vorleimung und Grundierung existieren nur wenige schriftliche Quellen. Darin werden folgende Bearbeitungsschritte genannt: Entfernung von Knoten durch Schleifen (z. B. mit dem Bimsstein), Abreiben der Leinwand mit Absinth, Knoblauch oder Zwiebeln, Waschen der Leinwand mit Pottasche oder Benzin.[360] Über ihren Stellenwert und Einfluss auf das hygrische Verhalten gibt es bisher keine Erkenntnisse. Die Aufspannung und die einseitige Beschichtung mit Grundierungs- und Farbschichten blockieren die Leinwand teilweise in ihren Bewegungen. Die Beobachtungen über das hygrische Verhalten einer Leinwand in ihrer Funktion als Bildträger, gehen auseinander und sind teilweise gegensätzlich. Berger/Russell, die umfangreiche Beobachtungen über Spannungen im Leinwandgemälde gesammelt haben, zogen das Fazit, dass jede ihrer getesteten Leinwände unterschiedlich auf Feuchte und Temperatur reagierten und selbst ein bestimmtes Material während der Versuche seine Reaktion graduell verändern kann.[361]

3.6.1 Gespannte Leinwand

Als Bildträger eines Leinwandgemäldes ist die Leinwand auf einen Spannrahmen aufgespannt, wodurch Dimensionsänderungen nur noch eingeschränkt möglich sind. Durch Dimensionsänderungen im fixierten Zustand wirken Kräfte auf die Leinwand. Diese äußern sich durch steigende oder nachlassende Spannung. Das richtungsabhängige Verhalten zeigt sich auch hier durch unterschiedlich hohe Spannungen in Kett- und Schussrichtung. Die Fadenrichtung, die stärker gespannt wird, nimmt an Bogigkeit ab, während sie in der weniger stark gespannten Richtung zunimmt.

Eine Leinwand kann sich elastisch, elastoplastisch oder plastisch verformen. Sie zeigt ein zeitabhängiges elastisches (viskoelastisches) Verhalten, welches mit zunehmender Verformung in ein plastisches Verhalten übergeht. Im elastischen Bereich tritt noch keine bleibende Verformung auf.[362] Ob die Verformung ausschließlich im elastischen Bereich liegt, hängt von der Höhe und Dauer der einwirkenden Kraft ab. Wird eine bestimmte Kraft überschritten, bzw. dauert diese zu lange an, kommt es zu einer plastischen, also dauerhaften Verformung. Die plastische Verformung kann durch das Einwirken einer sehr hohen Kraft sofort auftreten. Bei geringeren Kräften erfolgt sie über einen längeren Zeitraum, bis eine bestimmte Spannung unterschritten wird. Unterhalb dieses Punktes erfolgt keine weitere plastische Verformung. Dieser

360 Stols-Witlox 2014, S. 97.
361 Berger/Russell 2000, S. 277.
362 Reumann 2000e, S. 59—60.

Punkt wird in der englisch sprachigen Fachliteratur als „maximum sustainable tension“ bezeichnet. Jene Spannung also, die maximal gehalten werden kann. Der Prozess der Verformung über einen längeren Zeitraum wird als „Kriechen“ bezeichnet. Dabei gleiten die einzelnen technischen Fasern im Garn aneinander vorbei, wodurch das Garn länger wird und sich die Leinwand ausdehnt. Bei hohen Umgebungsfeuchten wird das Gleiten der Fasern durch die eingelagerten Wassermoleküle erleichtert. Diese Deformation kann nicht rückgängig gemacht werden. Berger/Russel sprechen daher von plastischer Deformation, Schaible bezeichnet es mit dem Ausleiern der Leinwand.[363] Ein mehrfaches Wiederholen von Spannung und Entspannung führt in Leinwänden zu einer Erhöhung ihrer Steifheit, ihre Spannungs-Dehnungs-Kurve wird steiler.[364]

Die auftretenden Spannungsänderungen machten sich viele Untersuchungen zu Nutze, die das hygrische Verhalten von Leinwänden oder Leinwandgemälden studierten. Ein Großteil der dazugehörigen Studien basiert auf dem Prinzip, dass die variierenden Spannungen in Folge wechselnder Umgebungsfeuchten an uni- oder biaxial gespannten Leinwänden aufgezeichnet wurden. In allen Fällen wurden die Spannungsänderungen in Bezug zur Umgebungsfeuchte gesetzt, nicht jedoch in Bezug auf die jeweilige Gleichgewichtsfeuchte des untersuchten Materials, wofür bisher keine geeignete Messmethode zur Verfügung steht. Aus den vorhergehenden Abschnitten dieses Kapitels geht hervor, dass die Gleichgewichtsfeuchte von Leinwänden sehr unterschiedlich sein kann. Folglich entsteht in der Beziehung zwischen Umgebungsfeuchte und Verhalten der Leinwand eine Einschränkung bzw. Ungenauigkeit für die Interpretationsmöglichkeit der Ergebnisse.

Die Spannung innerhalb einer Leinwand anzugeben, ist mit Schwierigkeiten verbunden. In den hier betrachteten Zusammenhängen wirken Zugspannungen. Die Spannung wird in der Festigkeitslehre ausgedrückt als eine Kraft pro Flächeneinheit. Um sie zu bestimmen, muss die Zugkraft F und die zugehörige Querschnittsfläche A bekannt sein. Während einer Zugprüfung lässt sich die momentane Querschnittsfläche an Geweben nur mit großer Schwierigkeit ermitteln, weil sie sich durch einwirkenden Kräfte verändert. Für die Berechnung der Zugspannung σ wird in der Textiltechnik daher der Quotient aus Zugkraft F und der mittleren Ausgangsquerschnittsfläche A_v benutzt, ohne die Verringerung der Querschnittsfläche infolge einer Dehnung des Gewebes zu berücksichtigen.[365] Sollen in der Textiltechnik unterschiedliche Gewebe verglichen werden, wird in der Regel die gemessene Kraft auf die Feinheit der Gewebe bezogen, was in der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft ausgedrückt wird. Die Gewebefeinheit ergibt sich aus der Summe der Feinheit aller in Zugrichtung liegenden Fäden.[366]

363 Berger/Russell 1988, S. 189—190; Schaible 1987, S. 86.
364 Young/Hibberd 1999b, S. 137.
365 Reumann 2000e, S. 62.
366 Reumann 2000f, S. 404.

In der konservierungswissenschaftlichen Literatur wurde die Spannung bisher in der Regel als Kraft pro Längeneinheit des Prüfkörpers angegeben, in N/m oder als Masse pro Längeneinheit. Definitionsgemäß handelt es sich dabei jedoch nicht um eine Spannung, weil die Querschnittsfläche unbeachtet bleibt. Young und Mecklenburg beziehen die Querschnittsfläche in ihre Berechnung der Spannung ein.[367] Es ist lohnenswert die verschiedenen Methoden zur Berechnung einer Querschnittsfläche von Geweben zu beleuchten, um der konservierungswissenschaftlichen Forschung eine Möglichkeit zu geben, entsprechende Ergebnisse in einheitlicher Form zu berechnen. Eine Übersicht über die gemessenen Kräfte, die in uni- und biaxialen Versuchen der konservierungswissenschaftlichen Literatur publiziert wurden, geben Young und Reuber.[368]

In der Konservierungswissenschaft wurden Leinwände uni- und biaxial geprüft. Als Bildträger eines Leinwandgemäldes ist das Leinwand biaxial fixiert. Weil die uniaxiale Prüfung ein etabliertes Verfahren der Textiltechnik und einfach in der Durchführung ist, beruht ein Großteil der innerhalb der Konservierungswissenschaft durchgeführten Versuche auf dieser Versuchsanordnung. Zu biaxialen Prüfungen des Gewebes konnten sich innerhalb der Textiltechnik weltweit keine Prüfverfahren etablieren, sodass in dieser Hinsicht nicht auf Erfahrungen zurück gegriffen werden kann.[369] Uniaxiale Prüfungen beanspruchen jeweils nur eine im Gewebe vorhandene Fadenrichtung, es kommt also zu keiner gleichzeitigen Zugkrafteinwirkung auf Kett- und Schussfäden. Die nicht fixierten Querfäden geben bei Beanspruchung der Längsfäden nach, was sich je nach Gewebestruktur in einer Querkontraktion des Streifens bemerkbar macht.[370]

Uniaxial gespannte Leinwand

Unter uniaxial gespannten Leinwänden werden an dieser Stelle all jene Leinwände zusammengefasst, die entweder an zwei gegenüberliegenden Seiten fixiert sind, sowie frei hängende Gewebestreifen, die am unteren Ende mit einem leichten Gewicht beschwert sind. Das Gewicht soll dem Zweck dienen, die Gewebe glatt zu halten, ohne dabei ihre Bewegungen einzuschränken.
Cornelius beobachtete an frei hängenden Leinwandstreifen mit einem leichten Gewicht beschwert, in Kettrichtung zunächst ein deutliches Schrumpfen bei Be- und Entfeuchtung. Nach zwei Be- und Entfeuchtungszyklen reagierte die Leinwand mit Ausdehnen während der Befeuchtung und Schrumpfen während der Trocknung. In Schussrichtung wich nur der 1. Zyklus vom anschließenden Verhalten ab. Während des ersten Zyklus schrumpfte das Gewebe bei Sorption und dehnte sich bei Desorption aus, danach verhielt es sich genau umgekehrt und

367 Young 1996, S. 141ff.; Mecklenburg/Tumosa 1991a, S. 143.
368 Young 1996, S. 80; Reuber 2010, S. 86—87.
369 Hempel 2000, S. 434.
370 Hempel 2000, S. 433.

identisch zur Kettrichtung des Gewebes.[371] Cornelius interpretierte diese Ergebnisse nicht. Aus heutiger Sicht kann man das anfängliche Schrumpfen als Relaxationsschrumpf bewerten mit der darauf folgenden hygralen Expansion.

Schaible wählte den gleichen Versuchsaufbau, beobachtete jedoch keinen anfänglichen Schrumpf, was wohl darin begründet liegt, dass er gewaschene Gewebe verwendete. Schaible stellte Unterschiede im Verhalten locker und dicht gewebter Leinwände fest: die lockeren Gewebe dehnten sich bei Befeuchtung aus, währenddessen sich die dichten Gewebe zusammenzogen. Er erklärte das Verhalten mit der eingelagerten Feuchte, die im Gewebe zunächst einen Verlust der Reibung verursacht. Durch die leichte Zugkraft des anhängenden Gewichtes dehnt sich das lockere Gewebe aus, weil die Schrumpfbewegung zu gering ist, um gegen das anhängende Gewicht entgegen zu wirken. Die dichten Gewebe zeigten zu Beginn eines Befeuchtens einen kurzen Spannungsabfall, wo sich ebenfalls der Verlust der Reibungskräfte bemerkbar macht. Sobald die Fasern eine gewisse Quellung erreicht hatten, setzte das Schrumpfen im Gewebe ein.[372] Der Unterschied zwischen den lockeren und dichten Geweben ist also im Versuchsaufbau begründet: bei gleicher Gewebegröße und identischem Gewicht wirkt auf den einzelnen Fäden des lockeren Gewebes eine höhere Kraft als auf den Fäden des dichten Gewebes, wenn man davon ausgeht, dass im lockeren Gewebe weniger Fäden pro Fläche vorhanden sind.

Mecklenburg machte an frei hängenden Geweben grundsätzlich die gleichen Beobachtungen wie Cornelius und Schaible an den locker gewebten Leinwänden. Sie dehnten sich jedoch nur bis zu einem gewissen Punkt aus, der etwas über 80 % rF liegt. Stieg die Umgebungsfeuchte weiter an, schrumpfte das Gewebe. Bei einer anschließenden Trocknung dehnte es sich wieder aus, bis es unterhalb einer rF von 80—85 % wiederum schrumpfte (Abb. 3.18).[373] Mecklenburg machte zwar die gleichen Beobachtungen, fand dafür jedoch eine andere Erklärung: Während das Schrumpfen bei hohen Feuchten genau wie bei den anderen Autoren auch mit der Breitenquellung des Garns erklärt wurde, wurde der Gewebeschrumpf während der Trocknung mit der Verkürzung der Fasern aufgrund der Desorption erklärt.[374] Aus heutiger Sicht können Mecklenburgs Daten mit den Erklärungsmodellen von Schaible in Einklang gebracht werden: Der Umkehrpunkt, den Mecklenburg beschreibt, ist genau der Punkt bei dem der Einfluss von anhängendem Gewicht wegfällt weil die Quellung der Fasern und dadurch auch des Garns hoch genug sind, um die entscheidenden Schrumpfbewegungen im Gewebe zu verursachen.

Genau wie Cornelius beobachtete Mecklenburg bei der ersten Befeuchtung das Schrumpfen des Gewebes (Abb. 3.18).[375] Seine Erklärung gibt er in einer früheren Publikation. Demnach vollzieht sich im Gewebe eine Veränderung der Garnkonfiguration, sobald das Gewebe erst-

371 Du Pont Cornelius 1967.
372 Schaible 1987.
373 Mecklenburg 2005, S. 123.
374 Mecklenburg/Tumosa 1991b, S. 175.
375 Mecklenburg 2005, S. 123.

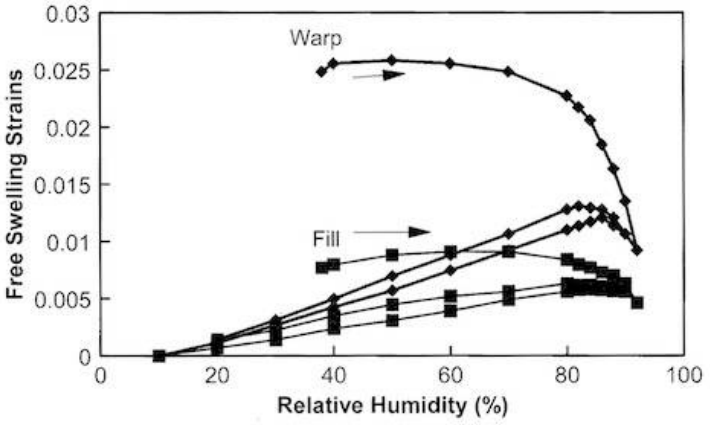


Abbildung 3.18: Dimensionsänderungen einer frei hängenden Leinwand aus MECKLENBURG *2005, S. 123.*

malig hohen Umgebungsfeuchten ausgesetzt ist. Diese Veränderung der Garnkonfiguration wird nicht näher erläutert. Sie soll dafür verantwortlich sein, dass es zu einer Umkehrung der Reaktion kommt.[376] Möglich wäre auch das Auftreten eines Relaxationsschrumpfes, wie es auch zu den zuvor genannten Untersuchungen passen würde.

Es lässt sich feststellen, dass die Dimensionsänderungen der uniaxial gespannten Gewebe von ihrer Geometrie und dem anhängenden Gewicht beeinflusst werden. Daraus lässt sich ableiten, dass die auf das Gewebe wirkende Kraft einflussgebend ist. Je höher diese Kraft ist, desto dichter werden die Fasern im Garn aneinander gedrückt, insgesamt nehmen die Zwischenräume im Gewebe ab, die Fäden liegen insgesamt gestreckter vor, wodurch die Möglichkeit zur hygralen Expansion abnimmt. Stattdessen führt das Quellen der Fasern und der Fäden zum Quellungsschrumpf im Gewebe. Ob sich ein Gewebe also ausdehnt oder schrumpft hängt davon ab, wie stark die einzelnen Fasern und Fäden durch eine auf sie wirkende Kraft aneinander gedrückt werden. Das erklärt auch das unterschiedliche Verhalten von Kett- und Schussrichtung innerhalb der Untersuchungen von CORNELIUS. Einen erstmaligen Beleg über den Zusammenhang vom Ausmaß der Dimensionsänderung und der Gewebegeometrie erbrachte DICK durch eine Korrelation der Längenänderung dreier Leinwände mit ihrer jeweiligen Bogigkeit der Fäden. Je höher die Einarbeitung (Bogigkeit) der Fäden in der Leinwand war, desto ausgeprägtere Dimensionsänderungen zeigten sie.[377] Weitere Untersuchungen über den Einfluss der Gewebegeometrie auf das hygrische Verhalten sind wünschenswert.
Alle Gewebe zeigten nach den Be- und Entfeuchtungszyklen eine bleibende Verkürzung.
Eine Erklärung für die unterschiedlichen Beobachtungen des Schrumpfens und Ausdehnens der Gewebe könnte die Höhe der Spannung im Gewebe sein.

376 MECKLENBURG 1982, S. 6.
377 DICK 2006, S. 48—49.

Biaxial gespannte Leinwand

Um das Verhalten des Gewebes im Kontext eines Leinwandgemäldes best möglich wiederzugeben, sind verschiedene Untersuchungen durchgeführt worden, die an allen vier Seiten fixierte Geweben betrachteten. Unter diesen biaxialen Versuchen, befassten sich drei Studien mit dem Verhalten von rohen Geweben, ohne weitere Beschichtungen.[378] Lipinski und Roche gaben an, dass die Gewebe zuvor nicht mit Wasser in Kontakt gekommen waren. Alle drei Studien beobachteten prinzipiell das gleiche Verhalten bei den Leinwänden. Sie verkleinerten sich bei Sorption (Spannungszunahme) und dehnten sich bei Desorption aus (Abnahme der Spannung) (siehe stellvertretend Abb. 3.19, schwarze Kurve). Lipinski beobachtete keine Veränderung dieses Verhaltens in zwei darauf folgenden Be- und Entfeuchtungszyklen (Variation zwischen 20—90 %rF).[379] Die einzelnen Untersuchungen unterschieden sich in dem Punkt, ab wann die Leinwände begannen zu schrumpfen. Roche verzeichnete das Schrumpfen ab ca. 45 %rF, Lipinski ab ca. 60 %rF. Berger/Russell stellten einen Einfluss der Gewebegeometrie fest: die offenen, wenig dicht gewebten Leinwände schrumpften ab ca. 65 %rF, während die dicht gewebten Leinwände ein Schrumpfen erst ab 80—90 %rF zeigten.[380]

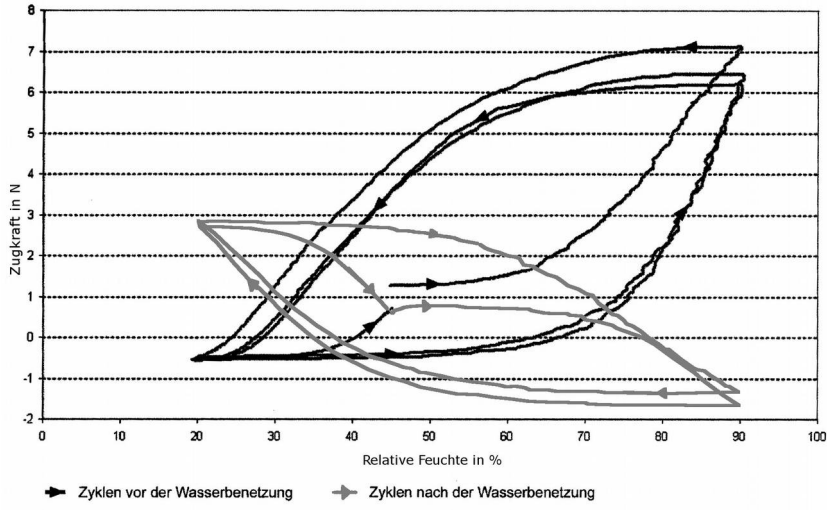


Abbildung 3.19: Spannungsänderung einer Leinwand, biaxial gespannt, vor und nach der Benetzung mit flüssigem Wasser. Aus Lipinski 2010, S. 113.

Kontakt mit flüssigem Wasser / Dekatieren

Der Kontakt der Leinwand mit flüssigem Wasser nimmt maßgeblichen Einfluss auf ihr hygrisches Verhalten. Weil das Dekatieren das vollständige Benässen der Leinwand umfasst, wird

378 Berger/Russell 1986; Roche 2005; Lipinski 2010.
379 Lipinski 2010, S. 67.
380 Berger/Russell 1986, S. 58.

diese Art der Leinwandvorbereitung zunächst geschildert, um dann auf die Wirkung des flüssigen Wasser näher einzugehen.

Unter Restauratoren ist das Dekatieren eine verbreitete Praxis, Gewebe in ihren Dimensionsänderungen in Bezug auf Feuchte unempfindlicher zu machen. Darunter ist nicht das Dekatieren im Sinne der Textiltechnik gemeint, was bei Wollerzeugnissen mittels Druck und Dampf die dimensionelle Stabilität erzeugen soll.[381] Im restauratorischen Kontext soll dieser Effekt durch das Benässen der gespannten Leinwand mit heißem Wasser erreicht werden. Nach dem Trocknen wird die Leinwand erneut gespannt. Dieses Vorgehen wird meist mehrmals wiederholt. Publizierte Beschreibungen des Vorgehens existieren kaum, in einem französischen Beitrag ist zusätzlich das Ausbeulen der Leinwand mit der Handfläche nach dem Trocknen beschrieben.[382] Ob das Dekatieren eine übliche maltechnische Vorbereitung der Leinwand war, ist nicht eindeutig belegt. Wehlte schreibt, dass ein Dekatieren der Leinwand bei Malern nicht üblich war, sondern nur für Sonderfälle von Restauratoren angewandt wird.[383] Auch Doerner schreibt ihm keinen Sinn für den maltechnischen Zweck zu.[384] Jedoch empfiehlt der spanische Maler Palomino die Vorbereitung der Leinwand durch gutes Benässen, bürsten, strecken und trocknen, was als Dekatieren gedeutet werden kann.[385] An dieser Stelle wäre die Auswertung von weiteren Quellenschriften wünschenswert, um die maltechnische Vorbereitung der Leinwand besser beurteilen zu können.

Das mehrmalige Nässen, Trocknen und Spannen des Gewebes bewirkt vor allem Veränderungen in der Gewebegeometrie. Die Bogigkeit der Kett- und Schussfäden nimmt insgesamt und beide Fadenrichtungen nähern sich diesbezüglich an. Es kommt grundsätzlich zu einer Abnahme des Flächengewichtes, der Gewebefüllung und der durchschnittlichen Fadenbreite. Der Fasersteigungswinkel im Garn nimmt hingegen zu.[386] Darüber hinaus hat ein dekatiertes Gewebe ein höheres Spannungshaltevermögen.[387] Ob diese Veränderungen im Gewebe von Dauer sind, war bisher nicht Gegenstand einer Untersuchung.

Die Leinwand vergrößert sich durch das Dekatieren. Das Benässen erzeugt eine hohe Spannung in der Leinwand, die bei der anschließenden Trocknung unter die anfängliche Spannung fällt. Die Leinwand wurde durch das ausgeprägte Schrumpfen über den Punkt des maximalen Spannungshaltevermögens gebracht und dadurch überdehnt.[388] Dabei gehen Berger/Russel von einer durchschnittlichen Vergrößerung der Leinwand von 2—4 % aus, was durch die Untersuchung von Lipinski bestätigt wurde.[389] Darüber hinaus werden die Unterschiede zwischen Kett- und Schussfäden in den Dimensionsänderungen geringer. Eindeutige Nachweise, ob das

381 Textillexikon s. v. „Dekatieren“ und „Trockendekatur“.
382 Guilly et al. 1981.
383 Wehlte 1967, S. 406.
384 Doerner 1922, S. 4.
385 Gramatke 2009, S. 163.
386 Guilly et al. 1981 und Lipinski 2010, S. 48. Für die Definition der genannten Merkmale siehe Kapitel 5.1.4, S. 165ff.
387 Berger/Russell 1986, S. 56; Lipinski 2010, S. 61.
388 Berger/Russell 1986, S. 57.
389 Berger/Russell 1988; Lipinski 2006, S. 15.

Dekatieren auf das Ausmaß der Dimensionsänderungen Einfluss nimmt, in welchem Maß z. B. das erwünschte „Ermüden" der Leinwand eintritt, sind nicht publiziert. Lipinskis Untersuchungen zielten zwar auf diese Fragestellungen ab, jedoch ist die Anzahl der Versuche zu gering, um diese Frage eindeutig zu beantworten. Zum Verhalten von dekatierten Leinwänden zogen Berger/Russell das Fazit, dass sie mit biaxial gespannten Leinwänden nur reproduzierbare Ergebnisse generieren konnten, wenn sie zuvor dekatiert wurden. Darüber hinaus waren sie der Meinung, dass eine nicht dekatierte Leinwand (mind. 2 mal) nicht als geeigneter Bildträger fungieren kann, der länger als 20—30 Jahre überleben soll.[390]

Wie sich die Menge der Feuchte durch das Dekatieren verändert, die von einer Leinwand aufgenommen werden kann, wurde bisher nur innerhalb einer Untersuchung erörtert. Sorptionsisothermen an unbehandelten und dekatierten Leinwänden ergaben, dass eine locker gewebte Leinwand nach dem Dekatieren weniger Feuchte aufnahm. Der Unterschied war jedoch erst ab einer rF von ca. 85 % sichtbar. Die Gleichgewichtsfeuchte einer dichten Leinwand veränderte sich in der gleichen Studie nicht durch das Dekatieren.[391] Die Tatsache, dass sich die Veränderungen erst bei hohen Umgebungsfeuchten bemerkbar machten, deutet auf Veränderungen in der Gewebegeometrie hin, wie sie für das Dekatieren bereits nachgewiesen wurden. Durch den Mangel an weiteren Daten zur Gleichgewichtsfeuchte dekatierter Gewebe, lässt sich diese Vermutung jedoch nicht belegen, sondern es kann ein weiterer Forschungsbedarf abgeleitet werden.

Entgegen den Unterschieden der bereits genannten Beobachtungen zur Reaktion von Leinwänden mit der Umgebungsfeuchte sind die ausgewerteten Untersuchungen einig, wie eine Leinwand reagiert, die mit flüssigem Wasser in Kontakt kommt: sie schrumpft. Dabei ist das Ausmaß sehr viel höher als es ein Schrumpfen durch das Einwirken von Wasserdampf ist.[392] Es gibt jedoch unterschiedliche Beobachtungen über das anschließende Verhalten der Leinwände, nachdem sie mit flüssigem Wasser in Kontakt gekommen sind: bei einigen Studien kehrte sich das Verhalten der Leinwände um. Die zuvor bei Sorption schrumpfenden Leinwände dehnten sich nach dem Wasserkontakt aus. Ausgelöst wurde diese Umkehrung durch das Waschen von ungespannten Leinwänden (Mager)[393], das Dekatieren (Dick, Abb. 3.20 und Neufert)[394] oder durch ein Besprühen der Leinwände mit Wasser im biaxial gespannten Zustand (Lipinski, Abb. 3.19)[395].

390 Berger/Russell 1988, S. 195.
391 Dick 2006, S. 37.
392 Young 1999, S. 86; Lipinski 2010, S. 73; Berger/Russell 1986, S. 57; Schaible 1987, S. 87.
393 Mager 2007, S. 64—65.
394 Dick 2006, S. 44—45; Neufert 2006, S. 46.
395 Lipinski 2010, S. 81—83.

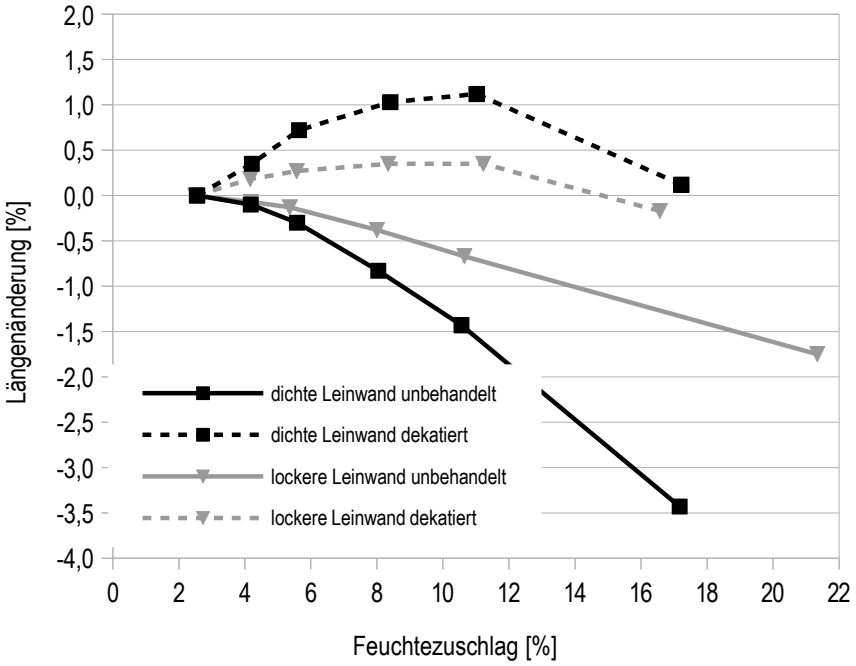


Abbildung 3.20: Dimensionsänderungen von zwei Leinwänden, unbehandelt und dekatiert.
Aufgezeichnet an frei hängenden Gewebestreifen, mit leichtem Gewicht beschwert.
Erstellt aus Daten aus Dick 2006, S. 93—96.

Hingegen erzeugte Schaible durch ein Besprühen der uniaxial aufgehängten Leinwände mit Wasser keine Umkehrung, er hatte seine Gewebe vor dem Versuch bereits gewaschen.[396]
Die bei den einzelnen Autoren beobachtete Umkehrung des Verhaltens in der Art der Dimensionsänderung scheint jedoch nicht allgemeingültig zu sein, da z. B das Dekatieren bei Lipinski keine Umkehrung der Reaktion hervor rief. Er konnte die Umkehrung des Verhaltens auch an seinen zuvor dekatierten Leinwänden, durch das Besprühen mit Wasser erzeugen. Lipinski untersuchte dieses Phänomen eingehender und stellte fest, dass die Leinwand in ihr ursprüngliches Verhalten zurück versetzt wurde, sobald die Leinwände aus ihrer biaxialen Spannkonstruktion heraus genommen wurden: Schrumpfen während der Sorption, nach Wasserkontakt Ausdehnen während der Sorption.[397]
Die Autoren fanden für die Umkehrung des Verhaltens keine übereinstimmende Erklärung. Während Lipinski keine Erklärung nannte, ordneten Dick und Mager das Schrumpfen der unbehandelten Leinwände dem Relaxationsschrumpf zu. Das könnte auch auf das Verhalten von Lipinskis Leinwände übertragbar sein, der beobachtete, dass das Schrumpfen der Leinwand bei Sorption immer wieder auftritt, sobald die Leinwände aus ihrer biaxialen Spannkonstruktion heraus genommen wurden. Der Relaxationsschrumpf trat in diesem Fall nicht aufgrund der aus der Produktion im Gewebe vorhandenen Spannungen auf, sondern durch die Spannungen, die sich innerhalb der biaxialen Aufspannung während der Versuchsdurchläufe aufgebaut hat-

396 Schaible 1987, S. 85.
397 Lipinski 2010, S. 82.

ten. Weil Mager die Umkehrungsreaktion auch bei Baumwolle beobachtete, scheint es nicht auf ein Phänomen hinzudeuten, welches nur auf Flachs beschränkt ist.[398]

Berger/Russell publizierten Ergebnisse von biaxial gespannten, dekatierten Leinwänden, die sich analog zu den uniaxial gespannten Leinwänden aus Mecklenburgs Versuchen verhielten: sie dehnten sich bei Sorption aus und schrumpften bei weiterer Sorption in Bereichen hoher Umgebungsfeuchte. Der Unterschied zu Mecklenburgs Ergebnissen lag in jenem Punkt der größten Ausdehnung des Gewebes. Berger/Russell verzeichneten diesen Punkt bei 60 %rF, mit einem signifikanten Schrumpf oberhalb 75 % um noch steiler zu steigen ab 95 %[399], während Mecklenburgs Leinwände zwischen einer rF von 80—90 % begannen zu schrumpfen (Abb. 3.18, S. 99).

Zusammenfassung

In der konservierungswissenschaftlichen Forschung wurden bisher keine Gleichgewichtsfeuchten von gespannten Leinwänden aufgezeichnet. Es liegen also keine Informationen darüber vor, ob und inwiefern sich die Feuchteaufnahme verändert, wenn eine Leinwand aufgespannt, bzw. unterschiedlich stark gespannt ist.
In Bezug auf das Dimensionsverhalten durch Sorption und Desorption einer gespannten Leinwand sind widersprüchliche Beobachtungen gemacht worden. Die Unklarheit, wann und warum sich eine ungespannte Leinwand ausdehnt und schrumpft, gilt ebenso für die gespannten Leinwand, nur dass zusätzlich auf die Leinwand eine gewisse Kraft wirkt, die das Verhalten beeinflusst. Durch Sorption wurde an gespannten Leinwänden sowohl ein Ausdehnen als auch ein Schrumpfen beobachtet. Dabei wurde auch beobachtet, dass sich das Verhalten während eines Versuches umkehren kann. Bei einem Teil der Untersuchungen wurde diese Umkehrung durch direktes Einbringen von flüssigem Wasser hervorgerufen[400], bei einem anderen Teil durch hohe Umgebungsfeuchten[401]. Es ist jedoch möglich, dass die hohen Umgebungsfeuchten ausreichten, um in der Leinwand die Menge des freien Wassers derart anzuheben, dass die Reaktion mit dem Einbringen von flüssigem Wasser vergleichbar ist. Die Ursachen und Auslöser für die Umkehrung blieb bisher unerklärt. Eine mögliche Erklärung ist der Relaxationsschrumpf.
Es kann also davon ausgegangen werden, dass der Kontakt mit flüssigem Wasser, möglicherweise auch sehr hohen Umgebungsfeuchten, und somit auch das Dekatieren der Leinwand ihr hygrisches Verhalten maßgeblich beeinflusst. Dies kann sowohl für den Bildträger eines historischen Leinwandgemäldes eine Rolle spielen als auch für die Interpretation von Experimenten an neuen Materialien. Insofern trifft die Schlussfolgerung von Berger/Russell zu, dass sich die

398 Mager 2007, S. 64—67.
399 Berger/Russell 1988, S. 195—196.
400 Dick, Lipinski, Mager, Neufert.
401 Cornelius, Mecklenburg.

vorhergehenden Behandlungen und Reaktionen des Gewebes auf sein zukünftiges Verhalten auswirken.[402]

Es wird davon ausgegangen, dass das Zusammenspiel zwischen Gewebegeometrie, insbesondere die Abstände der technischen Fasern im Garn zueinander und die Bogigkeit der Fäden im Gewebe, und der auf das Gewebe wirkenden Kräfte ein entscheidender Faktor sind. Anhand der publizierten Studien können jedoch keine konkreteren Schlüsse gezogen werden, weil die genannten Merkmale in den bisherigen Untersuchungen nur bedingt Berücksichtigung fanden. Dies hat unterschiedliche Gründe. Zum einen werden bestimmte Zusammenhänge erst durch eine überblickende Zusammenschau erkennbar, zum anderen fehlt in Bezug auf bestimmte Parameter die Möglichkeit, diese zu erfassen oder ein gemeinsamer Konsens für ihre Erfassung. So führen die bereits erläuterten Schwierigkeiten, die mit der Benennung der auf die Leinwand wirkenden Kraft oder der in der Leinwand wirkenden Spannung, zu einer Diversität in den einzelnen Studien, was die Vergleichbarkeit einschränkt. Es ist dringend nötig, geeignete experimentelle Abläufe zu entwickeln und zu definieren, wie die Spannung einer Leinwand bestimmt werden kann. Gleiches gilt für die Definition der Gewebegeometrie.

Da das Dimensionsverhalten der Leinwand offensichtlich von der auf sie wirkenden Kraft abhängt, hat der Versuchsaufbau der jeweiligen Studien einen großen Einfluss auf die Ergebnisse. Nicht nur ob uni- oder biaxiale Prüfanordnungen gewählt werden, sondern auch wie stark die Leinwände jeweils gespannt sind, muss berücksichtigt werden.

In den ausgewerteten Studien fällt auf, dass es diskutiert wurde, bei welcher Umgebungsfeuchte an bestimmten Leinwänden die jeweiligen Dimensionsänderungen zu beobachten war. Dick und Neufert stellten erstmalig einen direkten Zusammenhang zwischen der Gleichgewichtsfeuchte der Leinwand und ihren Dimensionsänderungen her. Die Daten entstammen zwar unterschiedlichen Messreihen, weil eine Messung der Gleichgewichtsfeuchte in situ bisher nicht möglich ist. Dieser Ansatz bietet aber eine Präzision für die Interpretation der Dimensionsänderungen einer Leinwand.[403]

3.6.2 Vorleimung

Durch verschiedene Quellen ist belegt, dass die historische Vorbereitung der Leinwand ein Vorleimen einschloss. Für die Vorleimung wurden den Quellen nach, verschiedene proteinische Leime tierischer Herkunft, sowie Stärkekleister verwendet. Vereinzelt wird auch heißes Öl empfohlen, was jedoch als Ausnahme gedeutet werden kann. Während in der Zeit zwischen 1600 und 1800 die überwiegende Zahl der Quellen eine Vorleimung empfiehlt, sieht die Mehrzahl der Rezepte des 19. Jhs. keine Vorleimung vor.[404] Die Leinwand zu leimen, diente vor allem dazu, die Zwischenräume des Gewebes zu schließen, um das Eindringen der nachfolgen-

402 Berger/Russell 1989, S. 193.
403 Dick 2006, S. 63.
404 Stols-Witlox 2014, S. 88, 142—143; Witlox/Carlyle 2005.

den Schichten zu verhindern. Darüber hinaus erwähnt eine Quelle, dass die Vorleimung sich auf die Flexibilität des Gemäldes auswirken wird. Die hygroskopischen Eigenschaften der Vorleimung gab Anlass, dass einzelne Quellen vom Auftrag einer Vorleimung abrieten, weil sie sich nachteilig auf die Haftung der Grundierung auswirken soll. Dies war auch der Grund, im 19. Jh. mit dem Zusatz alternativer Materialien zu experimentieren, wie z. B. Schellack. Ob diese in die Produktion eingingen, ist jedoch nicht bekannt.[405] Nachweise der Leimschicht im Rahmen von kunsttechnologischen Untersuchungen sind wenig publiziert.[406] Daher sind die Quellenschriften die primäre Quelle über die Materialien und Auftragstechniken der Vorleimung.
In der Zeit nach 1900 sind auch andere, z. B. synthetische Bindemittel als Vorleimung eingesetzt worden.[407] Der Großteil der Studien, die für diese Arbeit ausgewertet wurde, bezieht sich jedoch auf die genannten Materialien vor 1900, weshalb im Folgenden eine Beschränkung auf diese Materialien erfolgt. Dabei werden die ölige Vorleimung und Schellack als Ausnahme bewertet und nicht berücksichtigt.

Proteinische Leime

Tierische Leime werden aus dem Strukturprotein Kollagen aus Haut und Knochen gewonnen. In den Quellenschriften wird in der Regel Hautleim genannt. Von welchem Tier diese Häute stammen, variiert (Ziege, Schaft, Kuh, Schwein, Pergamentleim, Fischleim, Handschuhleim) bzw. wird nicht immer benannt. Jedoch scheint dies Einfluss auf die Qualität und Eigenschaften der Vorleimung zu nehmen, so z. B. auf die Haftung der Grundierung.[408]
Die dem Leim zugrunde liegenden Proteinketten sind in einer räumlicher Anordnung zueinander gebunden, die ihre Eigenschaften beeinflussen. Im wässrigen Umfeld und über 40 °C befinden sich die Molekülketten in Lösung. Für seine Verarbeitung liegt der Leim daher zunächst in einer warmen, wässrigen Lösung vor. Bei der Trocknung kommt es zu einer Verfestigung unter Gelbildung, bei der sich ein stabilisierendes Netzwerk aus mehreren Kettenmolekülen bildet. Das Gelieren wird massgeblich durch die Temperatur und Lösungskonzentration beeinflusst.[409]
Die Auftragstechniken der Leimlösung als Vorleimung variieren zwischen der warmen, wässrigen Lösung und verschiedenen Stadien des gelierenden Leims. Ist das Gelieren weit fortgeschritten, wird der Leim als Gallerte aufgespachtelt.[410] Die Konsistenz des Leims beeinflusst die Auftragsmenge und seine Eindringtiefe in das Gewebe. Sie reicht von einer vollständigen Durchdringung der Leinwand bis zum Aufliegen einer mehr oder weniger geschlossenen Schicht auf der Oberfläche. Die Auftragsart beeinflusst ebenso die Menge an Feuchte, die

405 Stols-Witlox 2014, S. 144—146.
406 Z. B. Mecklenburg 2007, S. 20, Portsteffen/Heckenbrücker 2008, Haller et al. 2017.
407 Haaf 1987, S. 48.
408 Stols-Witlox 2014, S. 146.
409 Zumbühl 2003, S. 95—96.
410 Witlox/Carlyle 2005, S. 520.

beim Vorleimen in die Leinwand eingebracht wird. Nach dem Auftrag trocknet der Leim in oder auf der Leinwand vollständig. Dabei schrumpft er (Abb. 3.21).

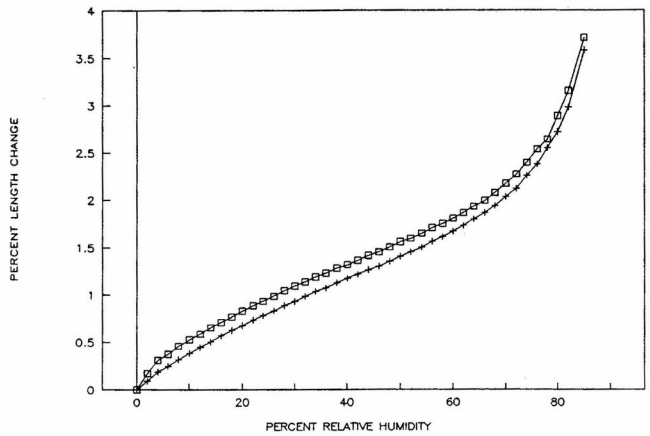


Abbildung 3.21: Dimensionsänderung zweier Proben von Hasenhautleim während der Desorption bei 25 °C. Aus Mecklenburg/Tumosa 1991b, S. 197.

Proteinische Leime bleiben nach ihrer Trocknung hygroskopisch. Die Sorptionsisothermen einiger tierischer Leimfilme sind in Abbildung 3.22 dargestellt. Diese Eigenschaft war laut Quellenschriften Auslöser für Haftungsprobleme der Grundierung. Daher ging die Empfehlung zu niedrig konzentrierten Leimlösungen, bzw. geringen Schichtdicken.[411]

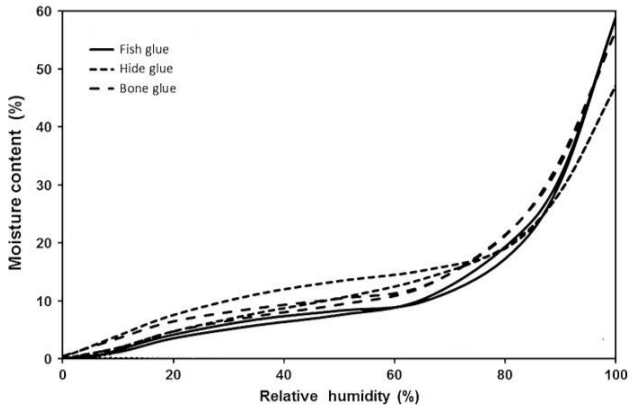


Abbildung 3.22: Sorptionsisothermen (25 °C) von Fischleim, Hautleim und Knochenleim. Die Dicke der Leimfilme beträgt 0,15 mm. Aus Mannes et al. 2014, S. 602.

Das Materialverhalten der proteinischen Leime wird von seiner molekularen Struktur bestimmt. Auch die Menge der aufgenommenen Feuchte ist einflussgebend, vor allem auf das physikalische Verhalten. Gelatine besitzt ober- und unterhalb von 65 %rF unterschiedliches Verhalten. Oberhalb verliert der Leim an Zugfestigkeit und wird deutlich dehnbarer bis hin zum gelartigen Zustand. Unterhalb von 65 %rF ist er sehr spröde. Gelatinefilme reagieren sehr

411 Stols-Witlox 2014, S. 235.

sensibel mit Volumensänderungen auf wechselnde Umgebungsfeuchten. Können sie sich dabei nicht frei verformen, entwickeln sie ohne Zeitverzögerung Spannungsänderungen.[412]
Mecklenburg beobachtete sowohl an gespannten als auch an freien Filmen von Hasenhautleim ihr Ausdehnen während der Sorption und ihr Schrumpfen während der Trocknung (Abb. 3.21, S. 107).[413] Dies wurde auch von Lipinski an biaxial gespannten Gelatinefilmen so bestätigt (Abb. 3.23).[414] Karpowicz erweiterte mit seinen Untersuchungen dieses Verhalten insofern, dass er nachwies, dass intern aufgebaute Kräfte im Leimfilm Auswirkungen auf sein folgendes Dimensionsverhalten haben. Werden die Leimfilme beim Trocknen fixiert, wird der Film bei einer anschließenden Befeuchtung schrumpfen (Abb. 3.24). Dabei beeinflussen die Höhe der inneren Spannungen während des Trocknens und die Höhe der Umgebungsfeuchte während der anschließenden Befeuchtung, das Ausmaß des Schrumpfens (Abb. 3.24 und 3.25). Waren die Leimfilme bei der Trocknung uniaxial gespannt, reichte die Höhe der inneren Spannung nicht aus, um ein anschließendes Schrumpfen hervorzurufen. Zunächst dehnten sich die Leimfilme aus bevor sie schrumpften. Es ist offensichtlich ein Mindestmaß an Feuchte in den Leimfilmen erforderlich, um das Schrumpfen hervorzubringen. Je höher die Menge an aufgenommener Feuchte ist, desto größer war das Ausmaß des Schrumpfes. Bei einer anschließenden Trocknung schrumpften alle Filme noch weiter (Abb. 3.24). Die beschriebene Schrumpfung des Leimfilmes ist nicht bei der von Karpowicz durchgeführten zyklische Be- und Entfeuchtung zu erkennen. Der Autor begründet dies mit der zu kurzen Befeuchtungsdauer. Insgesamt kam es zu einer kontinuierlichen Schrumpfung weil die Schrumpfung beim Trocknen des Filmes größer war als die Ausdehnung während der Befeuchtung (Abb. 3.26).[415]

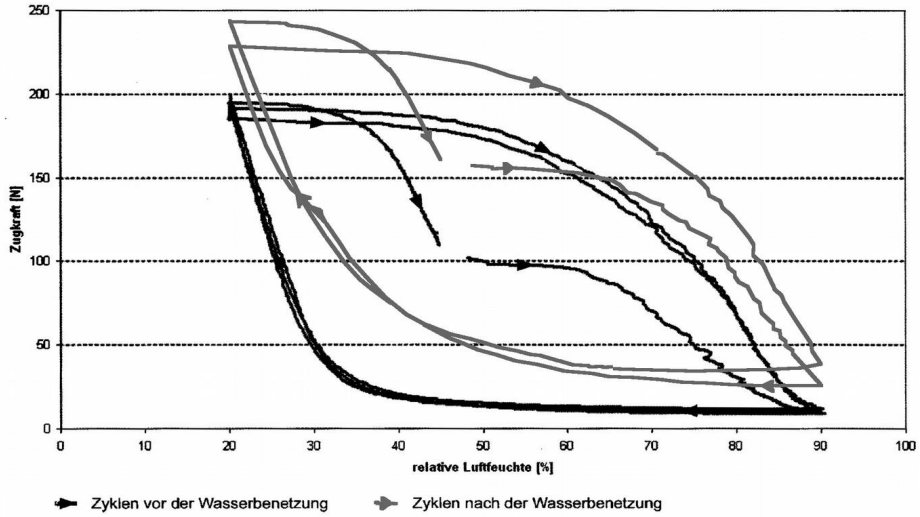


Abbildung 3.23: Dimensionsänderungen eines Gelatinefilms biaxial gespannt, bei variierenden Umgebungsfeuchten. Aus Lipinski 2010, S. 159.

412 Zumbühl 2003, S. 98, 100.
413 Mecklenburg 1982, Abbildungen 4 und 13 ohne Seitenangabe.
414 Lipinski 2010, S. 159.
415 Karpowicz 1989.

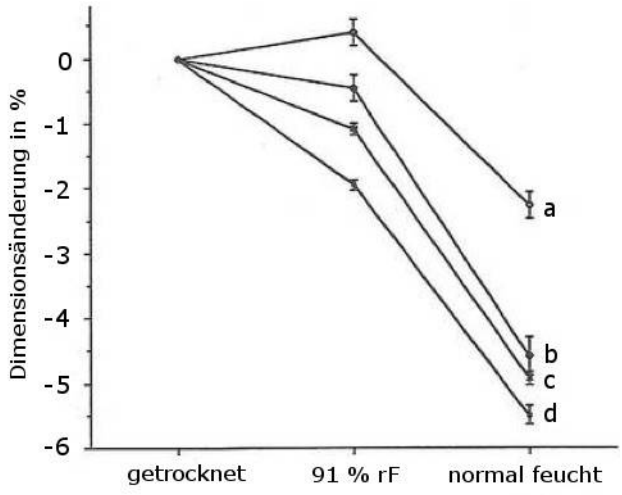


Abbildung 3.24: Dimensionsänderungen von Hasenhautleimfilmen, die während der vorhergehenden Trocknung unterschiedlich gespannt waren. Aus Karpowicz 1989, S. 69.
a) uniaxial gespannt, b) biaxial gespannt, c) auf Aluminiumplatte getrocknet.

Es lässt sich schlussfolgern, dass das mechanische Verhalten von proteinischen Leimen maßgeblich sowohl von ihrer Gleichgewichtsfeuchte als auch von möglicherweise intern aufgebauten Kräften abhängt. Unterhalb von 64 %rF schrumpfen die Leimfilme und können dabei hohe Spannungen entwickeln. Oberhalb von 64 %rF ist das Dimensionsverhalten ein Produkt

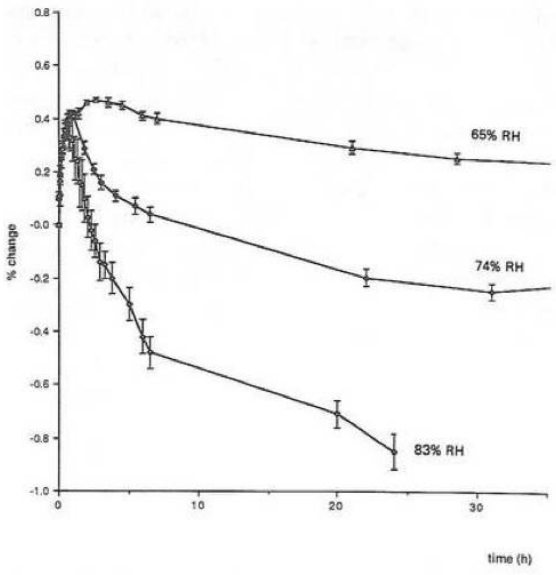


Abbildung 3.25: Schrumpfen eines Hasenhautleimfilms durch Befeuchtung. Der Leimfilm wurde zuvor auf einer Aluminiumplatte getrocknet. Aus Karpowicz 1989, S. 70.

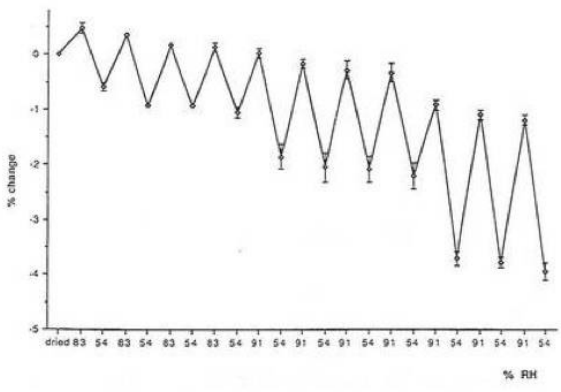


Abbildung 3.26: Schrumpfen eines Hasenhautleimfilms durch zyklisches Be- und Entfeuchten. Aus Karpowicz 1989, S. 71.

zweier parallel ablaufender Prozesse, die in Konkurrenz zueinander stehen: das Schrumpfen durch Molekülorientierungen einerseits und die plastische Materialverstreckung auf der anderen Seite. Die einwirkende Kraft auf den Film ist ausschlaggebend in welchem Verhältnis sich diese beiden Prozesse befinden.[416]
Der in Quellenschriften erwähnte Honigzusatz, der den Leimfilm elastisch halten soll, hat nachweislich den gegenteiligen Effekt und könnte die Versteifung des Filmes verstärken.[417]

Stärkekleister

Stärke ist pflanzlichen Ursprungs und kann aus Getreidekörnern (z. B. Weizen, Roggen) oder Kartoffeln gewonnen werden. Sie ist ein polymeres Kohlenhydrat und besteht aus drei verschiedenen D-Glucopyranose-Polymeren, der Amylose, dem Amylopektin und einer Zwischenfraktion, die als anormales Amylopektin bezeichnet wird. Die Stärkekörnchen variieren je nach Herkunft in ihrer Größe. Sie sind unlöslich in kaltem Wasser. In heißem Wasser quellen sie auf ein vielfaches ihres Volumens und bilden ein Sol, welches als der eigentliche Kleister bezeichnet wird.[418] Der Kleister ist sehr hochviskos, im Gegensatz zu den proteinischen Leimen kann er die Leinwand nicht vollständig durchtränken, sondern bleibt immer mehr oder weniger filmbildend auf der Oberfläche stehen.
Nach historischen Quellen zu urteilen, wurde Kleister seltener als Vorleimung verwendet als proteinische Leime. Woraus die genannten Kleister hergestellt wurden, ist den Quellen nicht immer zu entnehmen, erwähnt werden Weizen und Roggen. Vereinzelt werden auch Zusätze genannt: Öl, Leim, Knoblauch, Honig, Terpentin und Honig. Sie sollen die Vorleimung weniger steif machen oder vor Schimmel schützen.[419] Die Verifizierung von Kleister als Vorleimung durch kunsttechnolgoische Untersuchungen ist bisher nur vereinzelt erfolgt.[420] Sie nehmen gegenüber den proteinischen Leimen eine untergeordnete Stellung in jenen Studien ein, die sich mit dem hygrischen und mechanischen Verhalten des Leinwandgemäldes beschäftigen und im Rahmen der vorliegenden Arbeit ausgewertet wurden.
Der aus gekochter Stärke gewonnene Film bleibt auch nach dem Trocknen hygroskopisch, wie Abb. 3.27 verdeutlicht.

416 Zumbühl 2003, S. 101.
417 Zumbühl 2003, S. 97 und Schellmann 2007, S. 61.
418 Römpp Lexikon Online s. v. Stärke.
419 Witlox/Carlyle 2005, S. 522; Stols-Witlox 2014, S. 148—150.
420 Carlyle et al. 2008, S. 123.

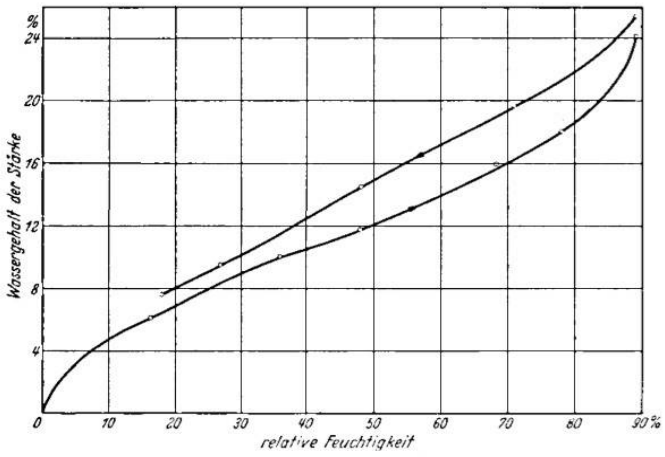


Abbildung 3.27: Sorptionsisotherme (20 °C) eines Films aus gekochter Stärke. Aus Valkó 1937, S. 661.

Verhalten einer vorgeleimten Leinwand

Daten zur Gleichgewichtsfeuchte von vorgeleimten Geweben wurden bisher nicht publiziert. Es werden Unterschiede hinsichtlich der Art des Leims und der Auftragsmenge erwartet.
Warm aufgetragene proteinische Leimlösungen, die das Gewebe zu einem gewissen Teil durchdringen, verursachen im getrockneten Zustand eine Versteifung des Gewebes und ein erhöhtes Spannungshaltevermögen.[421] Berger/Russell und Lipinksi verzeichneten bei den geleimten Geweben insgesamt höhere Spannungen als in den ungeleimten Geweben.[422]
Verschiedene Autoren beobachteten bei ihren Versuchen, dass sich ein mit proteinischen Leimen vorgeleimtes Gewebe bei Erhöhung der Umgebugsfeuchte ausdehnt und beim Trocknen wieder zusammenzieht.[423] Diese Beobachtung trifft sowohl auf uni- als auch biaxial gespannte Leinwände zu. Sowohl Berger/Russell als auch Roche beobachteten das gleiche Verhalten, jedoch zusätzlich bei einigen Proben den Quellungsschrumpf bei sehr hohen Umgebungsfeuchten (Abb. 3.28, S. 112).[424] Berger/Russell schreiben dem Leim die Funktion zu, dass er bei niedrigen Umgebungsfeuchten im Gewebe den Quellungsschrumpf verhindert bzw. verzögert. Ob der Quellungsschrumpf eintritt, hängt ihren Untersuchungen nach, mit der Konzentration des Leimes zusammen. Ein Gewebe welches mit einer 6%igen Leimlösung vorgeleimt war, musste deutlich länger einer hohen Umgebungsfeuchte ausgesetzt werden, um den Quellungsschrumpf zu provozieren, als ein Gewebe mit einer 3%igen Vorleimung.

421 Berger/Russell 1988, S. 197; Young 1996, S. 159—160; Lipinski 2010, S. 61.
422 Berger/Russell 1988, S. 197; Lipinski 2010, S. 66.
423 Du Pont Cornelius 1967, S. 78; Schaible 1987, S. 87; Lipinski 2010, S. 65.
424 Berger/Russell 1988, S. 198; Roche 2005, S. 201.

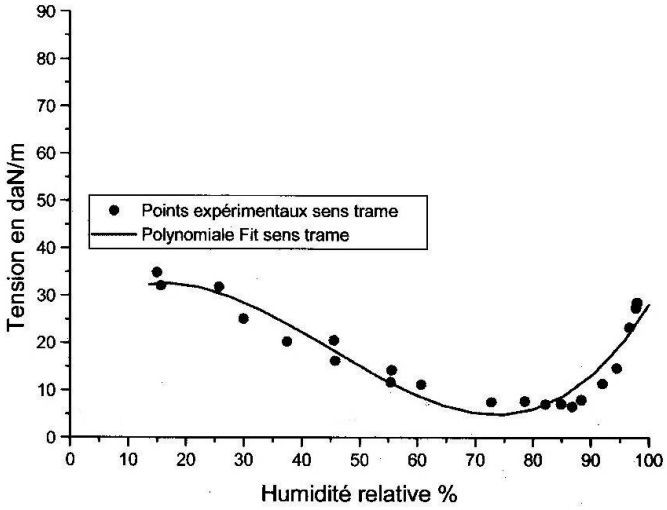


Abbildung 3.28: Verhalten einer vorgeleimten Leinwand in Schussrichtung, biaxial gespannt, in Abhängigkeit der relativen Fechte. Aus Roche 2005, S. 201.

Alle Autoren, die geleimte Leinwände untersuchten, führten das jeweilige Verhalten der Leinwand auf den Leim zurück. Diese Interpretation ist insofern interessant, als einige Autoren dieses Verhalten bereits an den ungeleimten Leinwänden aufgezeichnet hatten. Die ungeleimte Leinwand zeigte bei Berger/Russell ebenfalls ein Ausdehnen bei Sorption, nur dass der Quellungsschrumpf deutlich früher einsetzte, als bei der geleimten Leinwand.[425] Sowohl Mager als auch Lipinski sahen nicht den eingebrachten Leim als Ursache des Verhaltens, sondern die Tatsache, dass während des Auftrags der Leimlösung eine gewisse Menge Wasser in die Leinwand eingebracht wurde. Dieser Wassereintrag verursachte die gleiche Umkehrung des Verhaltens wie auch das Benässen der rohen Leinwand.[426]

Dass also allein das Verhalten des Leimes bestimmend ist und das Verhalten der Leinwand vollständig überlagert, wie es Berger/Russell formulieren, kann aus diesen Ergebnisse nicht abgeleitet werden. Es scheint eher die Menge der eingebrachten Feuchte bzw. Wasser entscheidend zu sein.

Lipinski und Schaible beobachteten neben Be- und Entfeuchtungszyklen auch die Reaktion der geleimten Leinwand nach direktem Kontakt mit flüssigem Wasser. Beide Autoren beobachteten einen starken Quellungsschrumpf durch das Benässen. Lipinski beobachtete zuvor einen kurzen Spannungsverlust bevor die Leinwand deutlich schrumpfte und eine hohe Spannung aufbaute. Dieser kurze Spannungsabfall wurde mit dem sofortigen Entspannen des Leims durch den Wasserkontakt begründet. Der Quellungsschrumpf der Leinwand setzte etwas zeitverzögert ein.[427] Im Gegensatz zu den ungeleimten Leinwänden beobachtete Lipinksi bei den der Wasserbenetzung folgenden Be- und Entfeuchtungszyklen keine Umkehrung des Dimensionsverhalten an den geleimten Leinwänden.[428]

425 Berger/Russell 1988, S. 196, Abbildung 9.
426 Mager 2007, S. 72—74; Lipinski 2010, S. 83, 86.
427 Schaible 1987, S. 87 und Lipinski 2010, S. 74—75.
428 Lipinski 2010, S. 85.

Mecklenburg untersuchte diverse, im Gemälde vorkommende Schichten einzeln in ihren Dimensionsänderungen und hinsichtlich ihrer mechanischen Eigenschaften und kam zu dem Schluss, dass die Vorleimung die größten Spannungen bei wechselnder Umgebungsfeuchte entwickelt. Dementsprechend vermutete er in dieser Schicht auch den Ursprung der größten Spannungen im Gemälde. Seine Versuche basierten auf der Messung der Materialien als unabhängige Filme voneinander. Experimentell untersuchte er keine geleimten Leinwände. Die Kombination der einzelnen Komponenten erfolgte rechnerisch. Die Bestätigung seiner Beobachtungen erfolgte mit einem Vergleich eines Gemäldes aus dem 19. Jh, wobei eine hohe Übereinstimmung gefunden wurde.[429]
Zumbühl fasste die Eigenschaften des Gelatinefilms folgendermaßen zusammen: Insgesamt sind Kollagen basierte Filme ein sehr feuchtesensibles System, welches schnell mit Spannungsänderungen auf wechselnde Umgebungsbedingungen reagiert. Die Spannungsänderungen führen durchaus zu mechanischen Belastungen angrenzender Schichten. Zu einem Spannungsabbau kann es nur durch Deformation des Substrats, oder durch mechanisches Versagen des Films selbst kommen.[430] Die Eigenschaften eines proteinischen Leims als einzelner Film ist gut belegt und nachvollziehbar, jedoch ist in Frage zu stellen, ob der Leim in einem Leinwandgemälde als zusammenhängender Film betrachtet werden kann, wie es die Darstellungen von Mecklenburg und Zumbühl beinhalten.

Alle bisher beschriebenen Betrachtungen beziehen sich auf proteinische Leime. In der Konservierungswissenschaft liegt lediglich eine Publikation von Carlyle et al. vor, die sich mit dem hygrischen Verhalten von Vorleimungen auf der Basis von Kleister beschäftigt. Die darin biaxial geprüften Leinwände mit einer Vorleimung aus Mehlkleister zeigten bei steigender Umgebungsfeuchte ein kontinuierliches Schrumpfen. Die Autoren interpretierten dieses Verhalten so, dass sich Leinwände, die mit Kleister vorgeleimt wurden, so verhalten, wie das rohe Gewebe: also ein Schrumpfen bei Sorption und ein Ausdehnen bei Desorption. Sie verhalten sich entgegengesetzt zu einer Leinwand, welche mit proteinischen Leimen vorgeleimt wurde und reagieren weniger sensibel auf wechselnde Umgebungsfeuchten. Der Vergleich zwischen den beiden Arten der Vorleimung erfolgte anhand neu hergestellter Kleister-Leinwände und einer historischen Hinterspannungsleinwand des 19. Jhs. bestehend aus Gewebe, proteinischem Leim und einer Grundierung aus Bleiweiß in Öl.[431] Durch das bisher geschilderte komplexe Verhalten proteinischer Leime und mit ihnen vorgeleimter Leinwände, ist es aus heutiger Sicht fraglich, ob die beschriebene Hinterspannungsleinwand als allgemeingültiges Beispiel einer mit proteinischem Leim vorgeleimten Leinwand gelten kann.

429 Mecklenburg 2005.
430 Zumbühl 2003, S. 102.
431 Carlyle et al. 2008.

Zusammenfassung

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Vorleimung in bisherigen Untersuchungen ein entscheidender Einflussfaktor im hygrischen Verhalten eines Leinwandgemäldes zugesprochen wurde. Demgegenüber steht eine sehr geringe Anzahl an experimentellen Untersuchungen, die das Verhalten von geleimten Leinwänden beleuchten. Darunter sind keine systematischen Vergleiche von verschiedenen Materialien, der Konzentration des Leims oder Auftragstechniken. Im Zusammenhang mit dem hygrischen Verhalten des Leinwandgemäldes wurden bisher nicht die Unterschiede zwischen gewerblicher bzw. maschineller und manueller Vorleimung untersucht. So wird dem kalt gespachtelten proteinischen Leim eine besondere Rolle im maltechnischen Aufbau der Gemälde des 19. Jhs. zugesprochen. Gleichzeitig wird ihr hohes Schrumpfpotential teilweise auf diese Form der Vorleimung zurück geführt. Jedoch ist diese Art der Vorleimung in nur zwei Untersuchungen experimentell berücksichtigt: bei der Untersuchung von ungespannten[432] und uniaxial gespannten Leinwänden.[433]

3.6.3 Grundierung

Grundierungen für Leinwandgemälde variieren in ihrer Zusammensetzung. Prinzipiell setzen sie sich aus Bindemittel und Füllstoff zusammen und können ein- oder mehrschichtig aufgetragen sein. Bei einem mehrschichtigen Auftrag können sich die einzelnen Schichten in ihrer Zusammensetzung unterscheiden. Einen Überblick zu verwendeten Materialien geben Witlox/Carlyle durch eine Auswertung von Quellenschriften aus dem Zeitraum zwischen 1600 und 1900.[434] Daraus wird ersichtlich, dass die Mehrzahl an Rezepten bis 1800 Öl als Bindemittel für die Grundierung vorsieht. Zusätzlich wurden Stärke und Leim genannt. Mit letzterem sind proteinische Leime gemeint. Im 19. Jh. nahm die Vielfalt der Bindemittel deutlich zu (z. B. Ei, Kasein; Harze und Gummen) und auch die Kombinationen von verschiedenen Bindemitteln als übereinander liegende Schichten wurde vielfältiger. Die Anzahl der Rezepte mit wässrigen Bindemitteln nahmen zu. Dennoch bilden auch nach 1800 die Rezepte mit Öl als Bindemittel einen großen Anteil. Aus der genannten Publikation geht nicht hervor, welches Öl in den Quellenschriften gemeint ist. Es wird angenommen, dass zumeist Leinöl verwendet wurde. Eine große Vielfalt ist in der Variation der Füllstoffe zu erkennen. Es werden sowohl Füllstoffe als auch Pigmente genannt: Gips, Kreide, Bleiweiß und verschiedene Erdpigmente.
Wie viel Feuchte die Grundierung aufnehmen kann und welchen Einfluss sie damit auf das hygrische Verhalten des Leinwandgemäldes nimmt, hängt von ihrer Zusammensetzung und Schichtdicke ab.

---

432 Mager 2007, S. 72—74.
433 Schaible 1987.
434 Witlox/Carlyle 2005; Stols-Witlox 2014, S. 137.

Leinöl ist nicht hygroskopisch und die Menge an aufgenommener Feuchte ist gering. Sie nimmt mit steigender Pigmentierung ab (Abb. 3.29). Nach Michalski kann man bei einer Grundierung von einer Pigmentvolumenkonzentration von mindestens 60 % ausgehen.[435] Die in Abb. 3.29 dargestellten Werte der Gleichgewichtsfeuchte von pigmentierten Ölfilmen einer Malschicht, die eine geringere Pigmentvolumenkonzentration aufweist, dürften demnach für eine Grundierung noch geringer ausfallen. Eine Sorptionsisotherme eines Halbölgrundes nach Wehlte wurde von Holl erstellt (Abb. 3.30).[436]

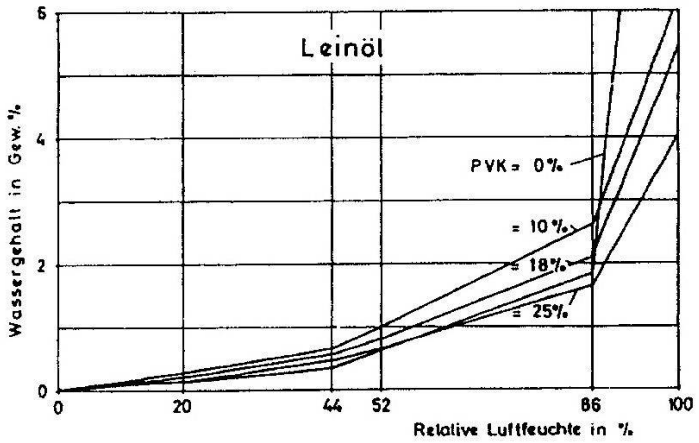


Abbildung 3.29: Sorptionsisothermen von Leinölfilmen mit unterschiedlicher Pigmentvolumenkonzentration (PVK) aus Klopfer 1974, S. 27.

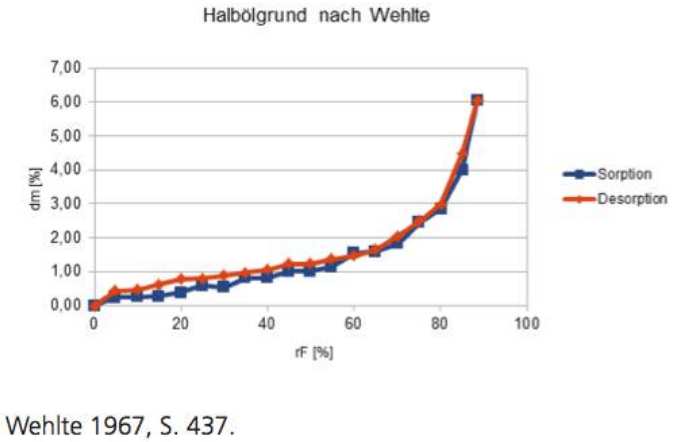


Abbildung 3.30: Sorptionsisotherme eines Halbölgrundes nach Wehlte. Aus Holl 2016, S. 184.

Ölbasierte Grundierungen zeigen geringe Dimensionsänderungen, was aus Abb. 3.31 (S. 116) deutlich wird. Obwohl die Daten aus der Abbildung von einer 10 Jahre alten Grundierung

435 Michalski 1991, S. 225.
436 Holl 2016, S. 184.

stammen, wurde sie an dieser Stelle herangezogen, weil in der konservierungswissenschaftlichen Forschung keine entsprechenden Daten einer neuen Grundierung publiziert sind.

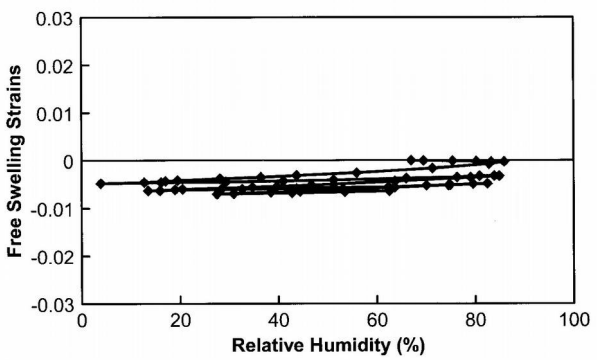


Abbildung 3.31: Dimensionsänderungen durch Sorption und Desorption eines 10 Jahre alten Films aus Bleiweiß in kalt gepresstem Leinöl. Aus Mecklenburg *2005, S. 129.*

Über die hygrischen Eigenschaften der proteinischen Leime und Stärken wurde bereits weiter oben berichtet (S. 106 ff.). Bisher wurde zu dieser Art der Grundierungen lediglich eine Sorptionsisotherme publiziert, die sich auf eine Leim-Kreide-Grundierung bezieht (Abb. 3.32). Diese setzt sich aus Gips, Kreide und Hautleim zusammen. Es wird deutlich, dass diese Leim-Kreide-Grundierung deutlich weniger Feuchte aufnimmt als der Halbölgrund aus Abb. 3.30.

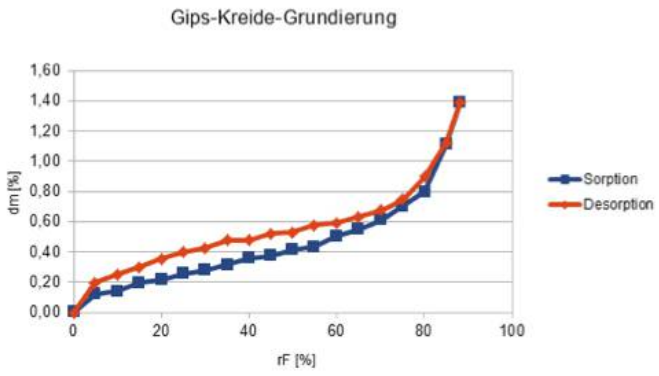


Abbildung 3.32: Sorptionsisotherme einer Leim-Kreide-Grundierung. Aus Holl *2016, S. 184.*

Obwohl proteinische Leime ein hohes Maß an Feuchte aufnehmen können, und mit deutlichen Volumensänderungen reagieren, ist die Dimensionsänderung von Leim basierten Grundierungen, die im Folgenden als Leim-Kreide Grundierungen bezeichnet werden, durch ihren hohen Füllstoffanteil weit geringer. Sie nimmt mit steigendem Füllstoffanteil ab (Abb. 3.33). Michalski geht bei Leim-Kreide Grundierungen von einer Pigmentvolumenkonzentration von

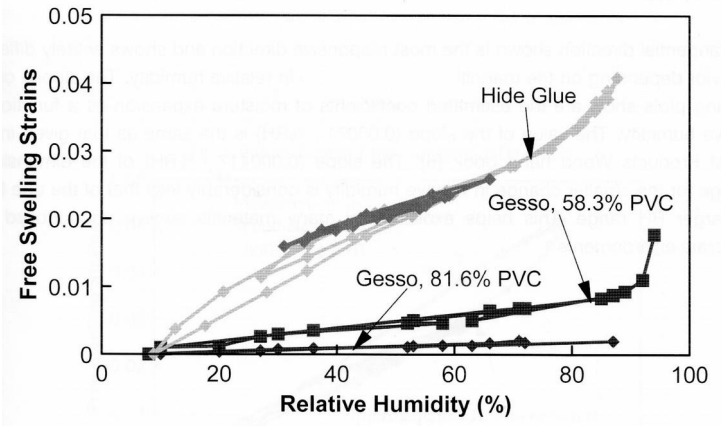


Abbildung 3.33: Dimensionsänderungen durch Sorption und Desorption von Hautleim (Hide Glue), Leim-Kreide Grundierung (Gesso) mit den Pigmentvolumenkonzentrationen (PVC) von 58,3 % und 81,6 %. Aus Mecklenburg 2005, S. 125.

90 % aus.[437] Prinzipiell zeigte Mecklenburgs Untersuchung, dass sich eine Schicht von Leim-Kreide Grundierung durch Sorption in sehr geringem Maß vergrößerte.[438] Eine andere Studie präzisierte dieses Verhalten hinsichtlich der Dimensionsänderungen nach zyklisch schwankenden Umgebungsfeuchten. Das Ausdehnen bei Befeuchtung und Schrumpfen bei Desorption zeigte sich als reversibler Vorgang sofern die Umgebungsfeuchte zwischen 20 und 80 %rF schwankte. Sobald sie jedoch in den Zyklen über 90 %rF stieg, stellte sich nach 20 Zyklen eine dauerhafte Verkleinerung der Leim-Kreide Filme ein.[439]

Weil die Grundierungen selbst mit wenig Dimensionsänderungen auf wechselnde Umgebungsfeuchten reagieren, beeinflussen sie das hygrische Verhalten des Leinwandgemäldes eher durch ihre jeweiligen mechanischen Eigenschaften.
Im Vergleich zu einer unbeschichteten und zu einer geleimten Leinwand weist eine grundierte Leinwand eine höhere Steifigkeit auf. Mit steigender Umgebungsfeuchte nimmt die Steifigkeit von Öl basierten Grundierungen ab, wie es in Abb. 3.34 für das Beispiel Bleiweiß in Leinöl gezeigt wird. Das gleiche Prinzip wurde auch für die Pigmente gebrannte Umbra, künstlicher

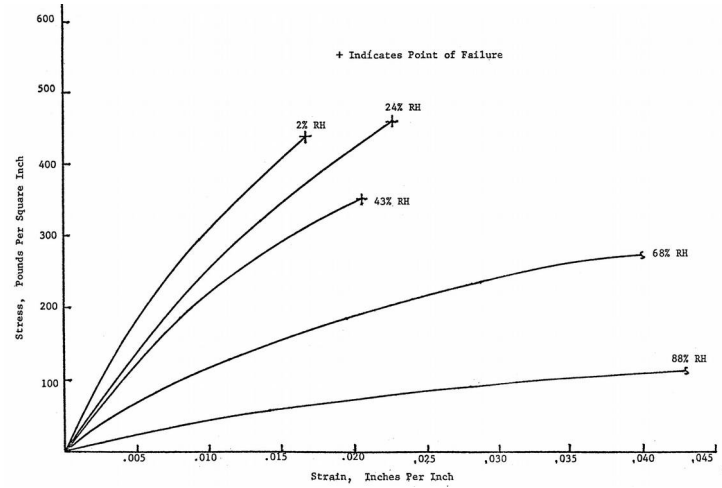


Abbildung 3.34: Auswirkung der Umgebungsfeuchte auf das Spannungs-Dehnungs Verhalten von Bleiweiß-Leinöl Filmen (36 Monate alt) bei 21°C. Aus Mecklenburg 1982, Abb. 6a, ohne Seitenangabe.

437 Michalski 1991, S. 225.
438 Mecklenburg 2005, S. 125.
439 Krzemien et al. 2016.

Zinnober und Titanweiß nachgewiesen. Sie unterschieden sich lediglich in der Höhe der absoluten Kräfte leicht voneinander.[440] Darüber hinaus wurden die Unterschiede in Schuss- und Kettrichtung geringer.[441]

Es existieren drei publizierte Untersuchungen, die Dimensionsänderungen an grundierten Leinwänden aufzeichneten. Schaible untersuchte ein Gewebe mit kalt gespachtelter Leimgallerte und einer Öl basierten Grundierung. Berger/Russell führten ihre Untersuchung an einer Leinwand mit Vorleimung (6%ige Leimlösung) und Öl-Bleiweiß Grundierung durch. Beide beobachteten an diesen Leinwänden das gleiche Verhalten, welches sie an einer geleimten Leinwand aufzeichneten: sie dehnten sich durch Sorption aus und schrumpften während der Desorption. Jedoch sind die Auswirkungen ihrer Reaktionen deutlich langsamer und geringer.[442] Andersen beobachtete ebenfalls dieses Verhalten und dem zusätzlichen Schrumpfen bei hohen Umgebungsfeuchten. Ihre Leinwände waren mit Hautleim vorgeleimt und mit einer Öl-Bleiweis Grundierung grundiert.[443]

Eine publizierte Untersuchung beschäftigte sich mit dem hygrischen Verhalten von Leinwänden, die mit einer Mehlkleister basierten Grundierung versehen waren. Dabei zeigte sich ein anderes Verhalten, als die bisher untersuchten, mit proteinischem Leim vorgeleimten und Öl-Bleiweiß grundierten Leinwände gezeigt hatten. Die allein mit Kleister grundierten Gewebe schrumpften im Zuge ihrer Befeuchtung kontinuierlich. Sie zeigten zu Beginn der Befeuchtung eine kurze Ausdehnung, was als Kriechen der Leinwand interpretiert wurde (Abb. 3.35).[444] Durch die Beigabe von hygroskopischem Kaolin oder Venezianer Terpentin, sowie das Aufstreichen einer Schicht Bleiweiß in Öl, wie es in historischen Rezepten empfohlen wurde, veränderte sich dieses Verhalten signifikant (Abb. 3.36).

Keine experimentellen Studien beschäftigen sich mit dem Dimensionsverhalten von Leinwänden, die mit Leim-Kreide grundiert wurden. Karpowicz beobachtete zwar die Entstehung von Sprüngen in einer solchen Leinwand, die Auswertung hinsichtlich des dimensionellen Verhaltens wurde jedoch nicht vorgenommen.[445]

440 Mecklenburg, Abbildungen 6a—d, ohne Seitenangabe.
441 Young 1996, S. 162.
442 Schaible 1987, S. 87; Berger/Russell 1988, S. 199—200.
443 Andersen 2013, S. 70, 76.
444 Carlyle et al. 2008, S. 128—129.
445 Karpowicz 1990.

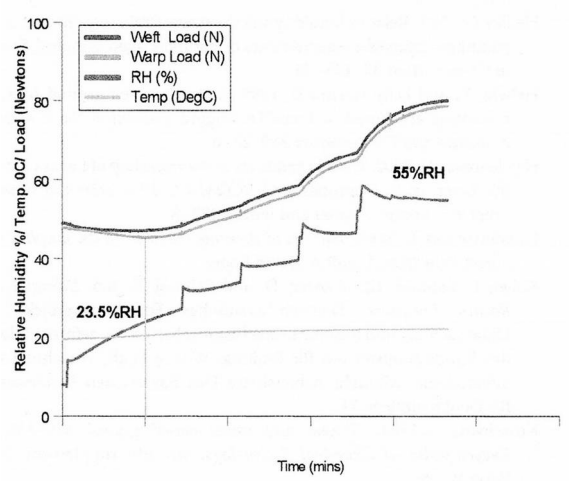


Abbildung 3.35: Biaxial gespanntes Gewebe mit Kleistergrundierung. Aus Carlyle et al. 2008, S. 129.

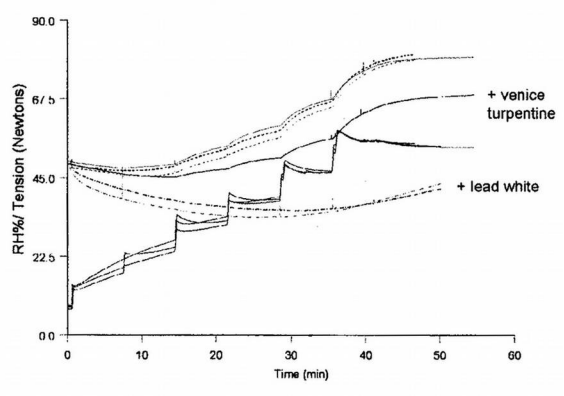


Abbildung 3.36: Biaxial gespannte Gewebe mit Kleistergrundierung, sowie Zusätzen von Venezianer Terpentin und Bleiweiß in Öl. Aus Carlyle et al. 2008, S. 129.

Zusammenfassung

Im Zeitraum zwischen 1600 und 1800 werden in den Quellenschriften hauptsächlich Öl basierte Grundierungen erwähnt, in geringerem Umfang werden Leim-Kreide und Kleister basierte Grundierungen genannt. Im 19. Jh. nimmt die Vielfalt der Bindemittel und Füllstoffe zu. In der Konservierungswissenschaft existieren keine publizierten Werte zur Menge der aufgenommen Feuchte oder Sorptionsisothermen für die genannten Grundierungen. Untersuchungen zu Dimensionsänderungen der Grundierungen aufgrund wechselnder Umgebungsfeuchten zeigten, dass sie insgesamt sehr gering ausfallen. Die Grundierung trägt der aktuellen Meinung nach, eher zu den mechanischen Eigenschaften des Gemäldes bei und hat eine versteifende Wirkung auf die Leinwand.
Dimensionsänderungen von grundierten Leinwänden wurden für Öl und Mehlkleister basierte Grundierungen gegenteilig beobachtet. Untersuchungen zum Verhalten von Leim-Kleister grundierten Leinwänden existieren nicht.

3.6.4 Malschicht

Die Malschicht eines Leinwandgemäldes kann aus sehr unterschiedlichen Materialien bestehen. Sie setzt sich prinzipiell aus Bindemittel und Pigment zusammen. In Bezug auf das hygrische und das mechanische Verhalten des Leinwandgemäldes wurde in bisherigen Studien in fast al-

len Studien trocknendes Öl (Leinöl) als Bindemittel für die Malschicht betrachtet. Roche beleuchtete zusätzlich das Verhalten von wässrig gebundenen Leimfarben.[446] Weil jedoch die Vielfalt der Zusammensetzung der Malschicht weit aus größer ist, steht der Konservierungswissenschaft an dieser Stelle noch eine Vielzahl von Untersuchungsmöglichkeiten offen.

Das hygrische Verhalten von Leinöl gebundenen Schichten wurde bereits im Zusammenhang mit der Grundierung thematisiert (Abb. 3.29, S. 115). In der Zusammensetzung unterscheiden sich Grundierung und Malschicht in technischer Hinsicht vor allem dahingehend, dass die in der Grundierung vorhandenen Füllstoffe in der Malschicht in einer größeren Variation von Pigmenten vorliegen und in der Malsicht die Pigmentkonzentration uneinheitlicher und tendenziell geringer ist. Darüber hinaus unterscheidet sich die Malschicht in der Homogenität und der Schichtdicke von der Grundierung.
Weil in der vorliegenden Arbeit der Schwerpunkt auf dem Bildträger des Leinwandgemäldes liegt, wurde für das Verhalten der Malschicht nur die konservierungswissenschaftliche Literatur ausgewertet, nicht jedoch grundlegende Literatur aus materialwissenschaftlicher Sicht, die für eine tiefer gehende Betrachtung hinzugezogen werden sollte.
Die Sorptionsfähigkeit eines pigmentierten Leinölfilmes variiert je nach Pigment (Abb. 3.37), ist aber im Vergleich zu Leinwand und Vorleimung deutlich geringer. Nach Mecklenburg nimmt eine Bleiweiß-Öl Schicht (42 Monate alt) 1,6 % Feuchte auf wenn die rF von 5 % auf 98 % angehoben wird.[447] Sorptionsisothermen von Hedley zeigen Gleichgewichtsfeuchten verschiedener Farbfilme zwischen 0,1 und 2,5 % bei 70 %rF.[448]
Zu vergleichbaren Werten kommt Holl durch die Erstellung von Sorptionsisothermen an Zinkweiß in Leinöl und Ocker in Leinöl (Abb. 3.38).
Die insgesamt geringe Sorptionsfähigkeit äußert sich in einer ebenso geringen Dimensionsänderung, die von Mecklenburg für verschiedene Filme im ungespannten Zustand gemessen wurde. Die Dimensionsänderungen variieren zwischen 0,33 und 1,77 %.[449] Berger/Russell nehmen an, dass kein Unterschied im Dimensionsverhalten auftritt, zwischen Leinwänden mit einer Öl-Bleiweiß Grundierung und solchen, die darauf folgend eine Öl gebundenen Malschichten aufwiesen.[450] Untersuchungen an Probekörpern, die über die Grundierung hinaus aus mit einer Malschicht versehen sind, sind wenig publiziert, sie werden im folgenden Abschnitt über das Gemälde als Materialverbund diskutiert.

446 Roche 2005.
447 Mecklenburg 1982, S. 4.
448 Hedley 1993, S. 120.
449 Mecklenburg 1982, Abbildungen 3a bis 3d, ohne Seitenzahl. Die Berechnung der prozentualen Veränderung befindet sich in Tab. A.11, S. 299.
450 Berger/Russell 1988, S. 33.

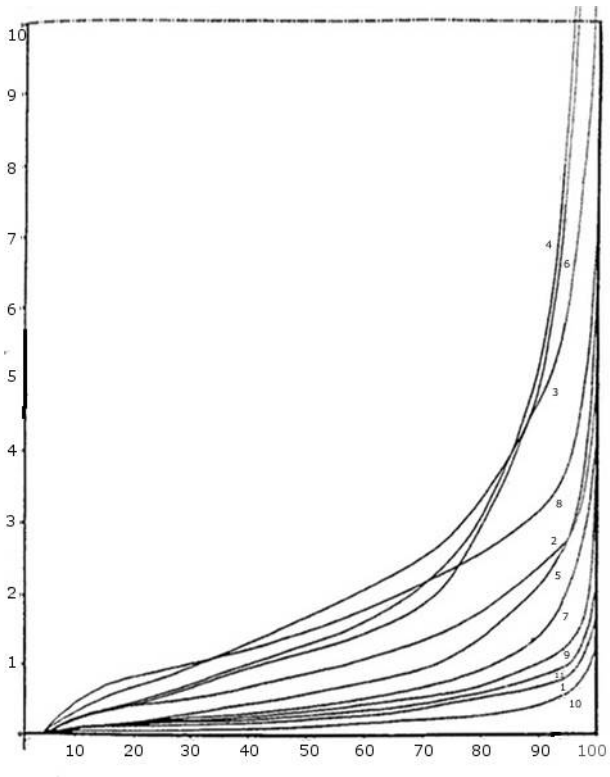
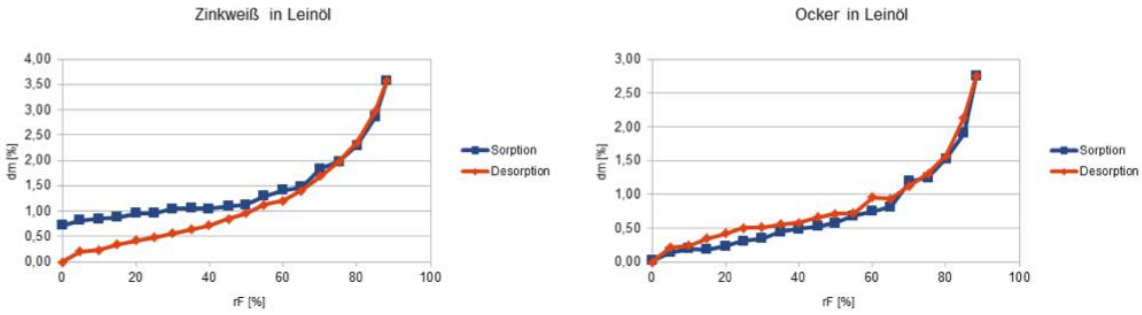


Abbildung 3.37: Sorptionsisotherme (20 °C) verschiedener Öl gebundener Farbfilme. Aus Hedley 1993, S. 120.

Y-Achse: Gleichgewichtsfeuchte [%], X-Achse: relative Feuchte [%].
Legende:
1. Flake white/linseed oil (1978) (Grumbacher),
2. Burnt sienna/linseed oil (1979) (Grumbacher)
3. Raw sienna/linseed oil (52%) (1981) (Grumbacher)
4. Prussian blue/linseed oil (41,5%), Safflower oil (3,2%) (1978) (Winsor & Newton)
5. Cadmium red, light(azo)/linseed oil (29%) (Winsor & Newton)
6. Burnt umber /linseed oil (43%) (1978) (Winsor & Newton)
7. Vermillion (azo)/linseed oil (25%) (1978) (Winsor & Newton)
8. Alizarin crimson/linseed oil (1978) (Grumbacher)
9. Cerulean blue/linseed oil (1978) (Grumbacher)
10. Cadmium red (light)/linseed oil (1978) (Grumbacher), 11. Titanium white/linseed oil (1978) (Grumbacher)



Zinkweiß bleifrei 46300, Leinöl natur kaltgeschlagen 73054, beides Kremer Pigmente, Verhältnis 1:1

Goldocker DD 40214, Leinöl natur kaltgeschlagen 73054, beides Kremer Pigmente, Verhältnis 2:5

Abbildung 3.38: Sorptionsisothermen von Zinkweiß bzw. Ocker in Leinöl. Aus Holl 2016, S. 184.

Der Einfluss der Malschicht auf das hygrische Verhalten des Leinwandgemäldes liegt hauptsächlich in den mechanischen Eigenschaften der Malschicht, die sich durch wechselnde Umgebungsfeuchten verändern können. Mecklenburg zeigt, dass Malschichten mit zunehmender Umgebungsfeuchte flexibler werden (Abb. 3.34, S. 117) . Michalski zeigt den gleichen Zusammenhang auch für ein Öl-Harz Gemisch.[451]

451 Michalski 1991, S. 232.

3.6.5 Gemälde als Materialverbund

Es sind nur wenige Experimente publiziert, die sich mit dem vollständigen Aufbau des Leinwandgemäldes beschäftigen, der Leinwand, Vorleimung, Grundierung und Malschicht umfasst. Ihre Mehrzahl wurde an originalen Gemälden des 19. und 20. Jhs. durchgeführt.[452] Aus diesen Daten und den experimentellen Daten, die an einzelnen Filmen neuer Materialien durchgeführt wurden, sind Modelle für das Verhalten des Leinwandgemäldes entwickelt worden.
Lediglich eine Untersuchung wurde von Roche publiziert, die das Verhalten eines neuen Leinwandgemäldes mit bekannter Zusammensetzung und definiertem Aufbau untersuchte.[453] Der Aufbau dieses Leinwandgemäldes bestand aus der Leinwand, proteinischer Leim tierischer Herkunft als Vorleimung, Leim-Kreide Grundierung und einer Öl gebundenen Farbschicht. Dieses Leinwandgemälde dehnte sich kontinuierlich während der Sorption aus (Abb. 3.39) und zeigte ein gleiches Verhalten wie die geleimte Leinwand der gleichen Studie, bis zu einer rF von 75 % (Abb. 3.28, S. 112). Die Schrumpfbewegung der geleimten Leinwand bei rF >75 % ist am Leinwandgemälde nicht aufgetreten.
Mecklenburg entwickelte ein Modell zum mechanischen Verhalten des Leinwandgemäldes. Seine Daten generierte er aus Messungen an einzelnen Materialfilmen, aus welchen das Leinwandgemälde zusammengesetzt ist. Für die Berechnung des Modells wurde die Finite-Elemente-Methode angewandt. Dabei wurde der Aufbau aus Leinwand, Vorleimung aus Hasenhautleim, Grundierung auf der Basis von Leinöl und ebenso einer Leinöl basierten Malschicht berücksichtig. Die Berechnung des mechanischen Verhaltens wurde durch eine Vereinfachung der Verhaltensweisen der einzelnen Schichten ermöglicht.[454] Dabei finden z. B. die komplexen Verhaltensweisen der Leimschichten wie sie Zumbühl und Karpowicz zeigten, keine Berücksichti-

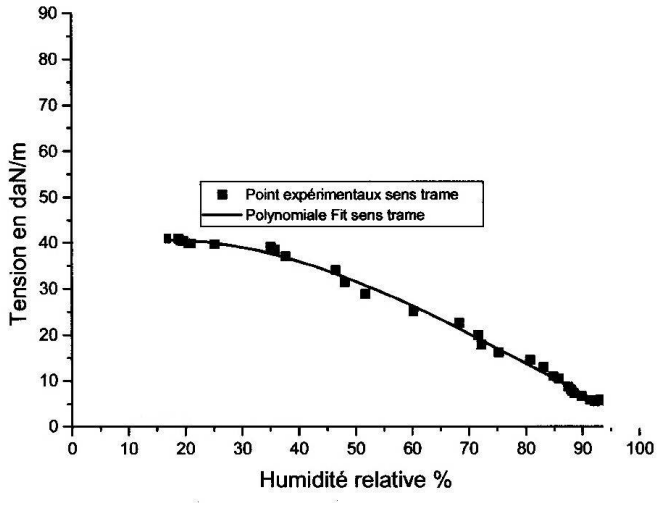


Abbildung 3.39: Verhalten eines Leinwandgemäldes in Schussrichtung biaxial gespannt, in Abhängigkeit der relativen Feuchte. Aus Roche 2005, S. 203.
Aufbau Gemälde: Leinwand, Vorleimung: proteinischer Leim, Leim-Kreide Grundierung, Öl gebundene Malschicht.

452 Die Ergebnisse aus diesen Studien werden im Abschnitt über das gealterte Leinwandgemälde, S. 140ff. diskutiert.
453 Roche 2005, S. 203.
454 Mecklenburg/Tumosa 1991b.

gung.[455] MECKLENBURG schreibt der Vorleimung die entscheidende Rolle für das mechanische Verhalten des Leinwandgemäldes bei wechselnden Umgebungsfeuchten zu, weil sie die größten Dimensionsänderungen zeigt und dadurch die höchsten Spannungen im Vergleich zu den anderen Materialien aufbauen kann. Bei niedrigen Umgebungsfeuchten gilt sie aufgrund ihrer hohen Steifigkeit als die tragende Schicht des gesamten Materialverbundes. Die mechanischen Eigenschaften der Leinwand sind aus seiner Sicht nicht existent. Es sei zwar möglich, den E-Modul zu bestimmen, weil sie im gespannten Zustand jedoch permanent dem Kriechverhalten unterliegt, ist sie nicht fähig, Spannung aufrecht zu erhalten. Erst bei sehr hohen Umgebungsfeuchten ist sie fähig, Spannung zu halten und übernimmt dann die tragende Funktion des Leinwandgemäldes. An diesem Punkt haben Vorleimung, Grundierung und Malschicht ihre Steifigkeit deutlich verringert.

Das errechnete Verhalten eines Leinwandgemäldes durch MECKLENBURG ist in Abb. 3.40 wiedergegeben. Demnach dehnt sich das Gemälde bei Befeuchtung bis ca. 85 %rF aus und schrumpft im Anschluss bei weiterer Befeuchtung deutlich. Die anschließende Trocknung lässt das Gemälde wiederum bis zum Wert von ca. 85 %rF ausdehnen um im Anschluss zu schrumpfen.

Die experimentelle Überprüfung dieses Modells erfolgte an einem originalen Gemälde des 19. Jhs. und fand prinzipielle Übereinstimmung. Wie an anderen Stellen immer wieder hervorgehoben wurde, weisen Gemälde des 19. Jhs. besondere Eigenschaften in ihrem Verhalten auf, aufgrund der in dieser Zeit auftretenden Veränderungen in der maltechnischen Zusammensetzung. Es ist bisher nicht überprüft worden, ob die beschriebenen Verhaltensweisen auch auf Gemälde anderer Entstehungszeit und Zusammensetzung zutreffen. Es wird nicht diskutiert, ob die Vorleimung in einem Leinwandgemälde überhaupt als homogene, zusammenhängende Schicht aufgefasst werden kann.

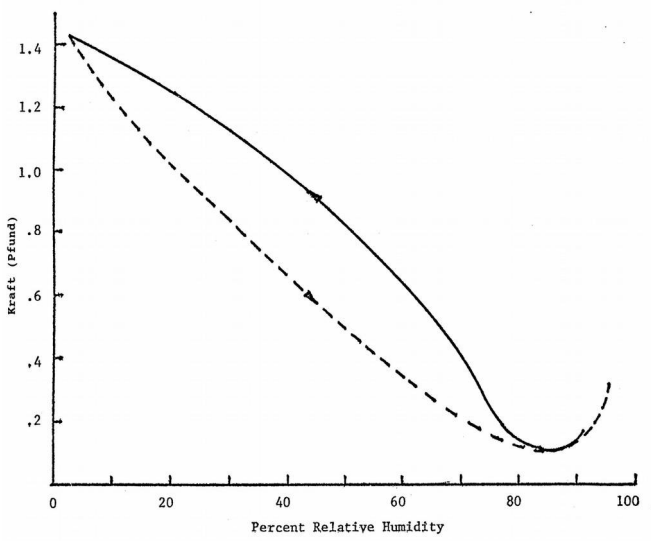


Abbildung 3.40: Berechnetes Verhalten eines Leinwandgemäldes aufgrund Sorption und Desorption. Aus MECKLENBURG 1982, Abbildung 15 ohne Seitenzahl.

455 Siehe Abschnitt Vorleimung, S. 105ff.

MICHALSKI berechnete ebenfalls ein Modell über das mechanische Verhalten des Leinwandgemäldes.[456] Eine Auswahl dieser Berechnung zugrunde liegenden Daten sind in Abb. 3.41 wieder gegeben. Er trifft mit Hilfe des Modells Aussagen zur Spannungsentwicklung im Leinwandgemälde u. a. aufgrund von Schwankungen der Umgebungsfeuchte. Dabei geht er von drei Annahmen aus: 1. Die Spannung im Gemälde ist die Summe aller Spannungen der einzelnen Schichten. 2. Die Spannung jeder einzelnen Schicht ist die Summe der Spannungen aus allen vorhergehenden Ereignissen. 3. Die Spannung jedes einzelnen Ereignisses ist gleich:
(Schrumpf oder Dehnung) x Steifigkeit bei entsprechender Feuchte, Temperatur oder Zeitspanne.
Aus dieser Annahme leitet er Werte ab, wie viel Spannung entsteht. Dabei wird im Aufbau des Leinwandgemäldes der Bildträger nicht berücksichtig, weil er laut MICHALSKI keine Einfluss nimmt. Die Daten beruhen auf sehr verallgemeinernden Annahmen. Dennoch stimmt es mit den Beobachtungen von HEDLEY und MECKLENBURG überein.

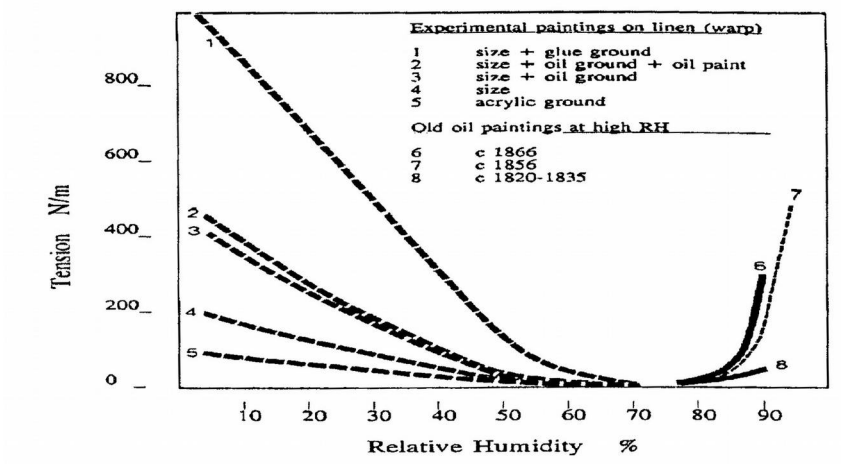


Abbildung 3.41: Spannungsänderungen verschiedener Materialien des Leinwandgemäldes, die Michalski als Grundlage für seine rechnerische Modellierung des Leinwandgemäldes verwendete. Aus MICHALSKI 1991, S. 237.

Die bisher durchgeführten Studien zum Verhalten des ungealterten Leinwandgemäldes haben gemeinsam, dass sich das Leinwandgemälde bei Befeuchtung ausdehnt. Die beiden berechneten Verhaltensmodelle von MECKLENBURG und MICHALSKI zeigen bei hohen Umgebungsfeuchten ein Schrumpfen des Leinwandgemäldes. Das von ROCHE untersuchte Leinwandgemälde zeigt ebenfalls ein Ausdehnen bei Sorption, jedoch kein Schrumpfen bei hohen Umgebungsfeuchten. Der Unterschied ist zum einen, dass zum einen berechnete Modelle gegenüber experimentellen Ergebnissen stehen, zum anderen, dass die berechneten Modelle auf einer Öl basierten Grundierung beruhen und die Ergebnisse von ROCHE eine Leim-Kreide-Grundierung annehmen.

456 MICHALSKI 1991.

Die Untersuchungen von Holl hatten zum Ziel, die Auswirkungen von klimatischen Kurzzeitschwankungen auf Kunstwerke zu beleuchten. Dabei konnte festgestellt werden, dass die Reaktionsgeschwindigkeit eines Gemäldes aufgrund von wechselnden Umgebungsfeuchten von der Schichtstärke und Diffusionseigenschaften der einzelnen, insbesondere der äußeren, Schichten abhängt.[457] Klimatische Schwankungen verursachen vor allem dann Schäden im Leinwandgemälde, wenn die einzelnen Schichten unterschiedliche Mengen Feuchte in unterschiedlicher Geschwindigkeit aufnehmen. So zeigte sich bei einer Malschicht aus Ocker gebunden in Ei weniger Feuchtedifferenzen im Leinwandgemälde als bei einer Malschicht bestehend aus Ocker in Leinöl.[458]

3.6.6 Zusammenfassung

Die Studien, die das hygrische Verhalten roher Leinwände untersuchten, zeigten Dimensionsänderungen aufgrund von wechselnden Umgebungsbedingungen, die häufig in Form von Spannungsänderungen aufgezeichnet wurden. Dabei wurde durch Sorption sowohl das Ausdehnen als auch das Schrumpfen von Geweben beobachtet. Kontakt mit flüssigem Wasser führte immer zu einem ausgeprägten Schrumpfen des Gewebes. Die Ergebnisse lassen vermuten, dass die Dimensionsänderungen maßgeblich von der Garn- und Gewebegeometrie, sowie der auf die Fäden wirkenden Kraft, die unterschiedliche Spannungen im Material erzeugt, bestimmt wird. Konkretere Schlüsse lassen sich aus den einzelnen Ergebnissen jedoch nicht schließen, weil die Dokumentation der Garn- und Gewebegeometrie bisher nicht oder nur rudimentär erfolgt ist. Darüber hinaus ist es mit Schwierigkeiten verbunden, die jeweilige Spannung im Gewebe zu dokumentieren, weil der dafür nötige Querschnitt des Gewebes nicht ohne weiteres zu bestimmen ist, und sich gleichzeitig permanent verändert. Eine direkte Vergleichbarkeit der Ergebnisse aus unterschiedlichen Untersuchungen ist daher nicht möglich.
Der Vorleimung mit proteinischem Leim wird hinsichtlich des hygrischen Verhaltens ein besonderer Einfluss zugesprochen, weil sie als einzelner Film bei wechselnden Umgebungsbedingungen hohe Spannungen aufbauen kann. Unterschiedliche Studien kommen zu dem Schluss, dass die Vorleimung das Dimensionsverhalten der Leinwand umkehrt. Diese Schlussfolgerung kann anhand der publizierten Studien nicht als allgemeingültig bestätigt werden. Dafür fehlen systematische Vergleiche zu Leimkonzentrationen und Auftragstechniken. Auch der Vergleich zu alternativen Materialien für die Vorleimung wäre wünschenswert. Lediglich eine Studie zu Kleister als Vorleimung kann als Vergleich herangezogen werden.
Eine eingeschränkte Auswahl der Versuchsmaterialien liegt auch für die Untersuchung des Verhaltens von grundierten und bemalten Leinwänden vor. In der Regel wurden ölbasierte Grundierungs- und Malschichten untersucht. Eine Grundierung auf der Basis einer Leim-

457 Holl 2016, S. 158.
458 Holl 2016, S. 113.

Kreide-Grundierung wurde bisher nur in einem Fall berücksichtigt. Das Leinwandgemälde, welches im Kontext des hygrischen Verhaltens bisher betrachtet wurde, entspricht also einem kleinen Ausschnitt der künstlerischen Techniken, die nicht das Verhalten aller Leinwandgemälde widerspiegeln kann. Studien, die einen vollständigen Aufbau des Leinwandgemäldes betrachten, sind ohnehin kaum durchgeführt worden. Nur eine Untersuchung wurde an neuen Probekörpern durchgeführt, deren Zusammensetzung exakt definiert werden kann. Untersucht wurden statt dessen in der Regel historische Gemäldeproben, deren Aufbau und Zusammensetzungen nur ungenau bekannt ist und zusätzlich von der fortgeschrittenen Degradation mitbestimmt werden. Für eine Verallgemeinerung der bestehenden Theorien fehlen systematische Untersuchungen.

Was in keiner aufgeführten Publikation Berücksichtigung findet, sind Rückschlüsse zur Gleichgewichtsfeuchte, die abhängig vom Material sehr unterschiedlich sein kann. Betrachtet wurde jeweils das Verhalten in Bezug auf die Umgebungsfeuchte. Schaible weist darauf hin, dass die durch ein Gemälde aufgenommene Feuchte nicht nur die Summe der Feuchte der einzelnen Schichten ist. Durch Wassereinlagerung an Grenzflächen zwischen den einzelnen Schichten kann sich die Menge erhöhen.[459] Bisher fehlt es an geeigneten Messinstrumenten, die Gleichgewichtsfeuchte in situ am Gemälde erfassen zu können. Dies wurde bereits von Ackroyd als Desiderat genannt.[460]

Die bisher publizierten Studien haben einen wesentlichen Beitrag für das heutige Verständnis des hygrischen Verhaltens des Leinwandgemäldes geleistet. Insgesamt ist die Anzahl der relevanten Untersuchungen überschaubar. Vor allem mit der Zunahme der Komplexität des Aufbaus des Leinwandgemäldes nimmt die Anzahl der publizierten Untersuchungen ab. Insgesamt wurden in den einzelnen Untersuchungen wichtige Fragestellungen bearbeitet und wegweisende Theorien entwickelt, die bis heute Gültigkeit besitzen. An dieser Stelle steht nun die Herausforderung, diese Erkenntnisse weiter zu differenzieren und die Vielfalt des Gemäldeaufbaus zu berücksichtigen und den Berechnungen experimentelle Messungen und Beobachtungen gegenüber zu stellen.

459 Schaible 1990, S. 247.
460 Ackroyd 2002, S. 10—11.

3.7 Degradation der Leinwand

Das hygrische Verhalten eines Leinwandgemäldes verändert sich im Laufe seiner Geschichte vor allem aufgrund der mehr oder weniger ausgeprägten Degradation. Die Degradation einer Leinwand wird in der Fachliteratur im Wesentlichen durch die Degradation seines Hauptbestandteils, der Cellulose erklärt. Die Begleitsubstanzen finden selten Erwähnung.
Die Degradation der Cellulose findet hauptsächlich an ihren Hydroxygruppen in den amorphen Bereichen statt. Oxidation und Hydrolyse sind die entscheidenden Mechanismen. In der Folge kann es parallel zu Vernetzungen, Ringöffnung und Kettenspaltung kommen.[461] Als äußere Faktoren spielen dafür Licht, Temperatur, Umgebungsfeuchte und die Anwesenheit von Sauerstoff eine wichtige Rolle. Die ablaufenden Mechanismen können nicht isoliert voneinander betrachtet werden. Vielmehr handelt sich um komplexe Vorgänge, die sich gegenseitig beeinflussen.

3.7.1 Degradationsmechanismen

Oxidation der Cellulose

Die Oxidation von Cellulose erfolgt zuerst am reduzierenden Ende der Anhydroglucoseeinheit (siehe Abb. 3.7, S. 46). Dabei wird die Aldehydgruppe (-HC=O) in eine Carboxylgruppe (COOH) überführt. Im Anschluss werden die Hydroxygruppen der Cellulosemoleküle oxidiert. Am C2 und C3 Atom werden sie dadurch in Carbonylgruppen (-C=O), am C6 Atom in Carboxylgruppen überführt.
Die Oxidation von Cellulose wird als Radikalmechanismus beschrieben, der als Kettenreaktion abläuft. Das erste Startradikal wird gebildet, indem ein Wasserstoffatom von einem Kohlenstoffatom der Anhydroglucoseeinheit abgetrennt wird. Auslöser dafür kann energiereiche Strahlung (Licht) sein oder oxidierende Stoffe, die in Kontakt mit dem Gewebe kommen. Dazu gehören z. B. trocknende Öle (aus der Grundierung oder Malschicht, aus restauratorischen Maßnahmen, z. B. Rückseitenanstriche) oder Metallverbindungen, vor allem Kupfer oder Eisen (Nägel der Aufspannung, metallhaltige Pigmente aus Grundierung oder Malschicht). Das zurückbleibende Kohlenstoffradikal am Glucosering reagiert weiter mit Sauerstoff, wodurch als Endprodukt unter Bildung weiterer Radikale, die oben genannten Carbonyl- und Carboxylgruppen entstehen.
Findet die Radikalbildung am C1- oder C4-Kohlenstoffatom statt, kommt es zu einer Aufspaltung der glycosidischen Bindung, wodurch die Celluloseketten kürzer werden und der DP ab-

461 Klemm et al. 1998, S. 83—84.

nimmt. Etwa ein Drittel der Oxidationsreaktionen führen zu einem solchen Bruch in der Cellulosekette. Die Oxidation findet hauptsächlich in den amorphen Bereichen statt.[462]
Die beschriebenen Veränderungen im Fasermaterial machen sich durch Änderungen der Festigkeitseigenschaften und des Absenken des pH-Wertes bemerkbar.

Hydrolyse der Cellulose

Der Hauptmechanismus beim Abbau von Cellulose ist die Hydrolyse. Wasser spielt als Reaktionspartner für die Hydrolyse eine wesentliche Rolle, weshalb sie in den amorphen Bereichen der Cellulose abläuft, wo Wasser leicht eindringen kann. Durch das Einbinden eines Wassermoleküls wird die glycosidische Bindung der Celluloseketten gespalten, wodurch der DP im Material abnimmt. Es entstehen zwei neue Kettenenden, wovon eines eine reduzierende Endgruppe darstellt.[463]
Die Hydrolyse läuft im sauren Milieu, also bei Anwesenheit von Hydroniumionen, deutlich schneller ab. Sauer reagierende Gruppen sind in der Cellulose in Form von Carboxylgruppen vorhanden, die während der Oxidation entstehen. Auch Hemicellulose und Lignin bilden während der Alterung saure Verbindungen, die beschleunigend auf die Hydrolyse wirken. Je höher die Konzentration der sauren Komponenten bzw. der Hydroniumionen im Material, desto wirksamer ist diese Reaktionsbeschleunigung. Daher wird der pH-Wert von Papier als Indikator für die Geschwindigkeit der ablaufenden Hydrolyse gewertet.
Die Materialfeuchte nimmt in mehrfacher Hinsicht Einfluss auf die Hydrolyse. Zum einen ist Wasser ein Reaktionspartner. Pro gespaltener glycosidischer Bindung wird ein Wassermolekül verbraucht. Zum anderen mobilisiert Wasser die Hydroniumionen, um an der Reaktion beschleunigend teilnehmen zu können. Und nicht zuletzt wirkt Feuchte im Material als Weichmacher, um die Verformung der Anhydroglucoseeinheiten zu ermöglichen, dass der Bruch an der Verbindungsstelle eintreten kann.[464]
Durch die Hydrolyse verkürzen sich die Ketten der Cellulose und der Anteil an kristallinen Bereichen steigt an.[465] Die Fähigkeit der Cellulose, in kristalline Zustände überzugehen, wird durch die Reduktion des DP begünstigt.[466] Diese Rekristallisation erhöht jedoch nicht die Festigkeit des Gewebes, weil die neu entstandenen Kristallite sehr klein sind (Abb. 3.42). Bei weit fortgeschrittener Hydrolyse verliert das Gewebe an Festigkeit und ist sehr brüchig.[467]

462 Whitmore 2015, S. 246–249.
463 Whitmore 2015, S. 241–242.
464 Whitmore 2015, S. 243–245.
465 Klemm et al. 1998, S. 91.
466 Sandy et al. 2010, S. 2.
467 Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 29.

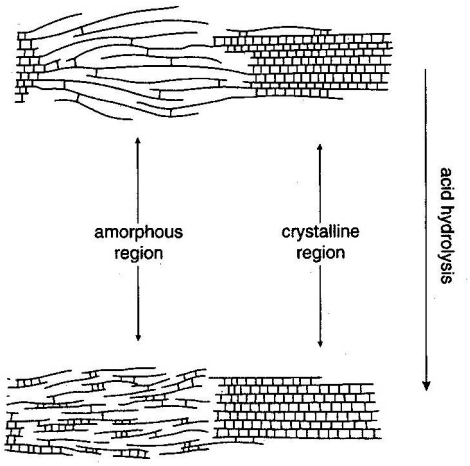


Abbildung 3.42: Veränderung des Verhältnisses zwischen amorphen und kristallinen Bereichen der Cellulose durch Hydrolyse. Aus Tímár-Balázsy/Eastop 1998 S. 29.

Begleitsubstanzen

Welche Rolle die Begleitsubstanzen, die neben Cellulose in der Elementarfaser des Flachs vorhanden sind, bei der Degradation spielen, ist in der konservierungswissenschaftlichen Literatur wenig thematisiert.

Kommt es zu einer Abnahme von Hemicellulose im Fasermaterial, wurde beobachtet, dass die Kristallinität in Cellulose basierten Materialien zunimmt. Durch ihre Reduzierung kann Hemicellulose nicht mehr als flexibilisierendes Material zwischen den Fibrillen fungieren. Die Fibrillen vernetzen sich stärker durch Bindungen der Celluloseketten untereinander, wodurch mehr kristalline Bereiche entstehen.[468]

Lignin ist hydrophob, diese Eigenschaft verliert es jedoch mit voranschreitender Degradation.[469] Ob sich diese Veränderung im hygrischen Verhalten eines Gewebes bemerkbar macht, ist bisher nicht untersucht worden. Der geringe Anteil lässt jedoch zunächst keinen gravierenden Einfluss vermuten.[470]

Hygrisches Verhalten degradierter Cellulose

Durch den Anstieg der Kristallinität verringert sich die Fähigkeit, Wassermoleküle zu binden.[471] Die Rolle des abnehmenden DP auf die Sorptionsfähigkeit von Feuchte wurde im Kontext von degradierten Geweben bisher nicht thematisiert, obwohl man in Bezug auf andere Faserstoffe niedrige Werte des DP dafür verantwortlich macht, dass mehr Feuchte gebunden werden kann.[472]

468 Florian 1987, S. 28.
469 Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 32—33.
470 Die Anteile von Lignin sind Tabelle 3.4, S. 57 zu entnehmen.
471 Siehe Abschnitt „Supramolekulare Ebene„, S. 46.
472 Tímár-Balázsy 1999, S. 661.

An Cellulose aus Papier wurde nachgewiesen, dass die Alterung eine verringerte Sorption und Quellfähigkeit bewirkt. Als Ursache vermutete Zervos, nicht nur chemische Veränderungen der Cellulose, sondern auch strukturelle Veränderungen, was durch die Messung der spezifischen Oberfläche erfasst wurde. Die Veränderung der Porenstruktur des gealterten Materials wurde durch einen Vergleich von Sorptionsisothermen vorgenommen.[473] Diese Untersuchung ist ein Beispiel, dass aus der Sorptionsfähigkeit von Cellulose basierten Materialien Informationen über deren strukturellen Aufbau abgeleitet werden können. Inwiefern sich diese Beobachtungen auch auf Gewebe übertragen lassen, ist bisher nicht untersucht worden.

3.7.2 Auslösende Faktoren

Licht

Rein photochemisch ausgelöste Spaltungen der Celluloseketten werden als Photolyse bezeichnet. Die Photolyse findet unabhängig von Temperatur, Anwesenheit von Sauerstoff oder Umgebungsfeuchte statt. Die Energie des sichtbaren Lichtes reicht jedoch nicht aus, um die Photolyse auszulösen. Der Grenzwellenbereich liegt für Cellulose bei 360 nm. Insbesondere sind es UV-Anteile des Tageslichtes im Wellenlängenbereich unter 300 nm, die dafür verantwortlich sind. Diese werden jedoch durch Fensterglas gefiltert und sind im Innenraum nicht zu erwarten. Energieärmere Strahlung wirkt beschleunigend auf die im Gewebe ablaufenden Abbaumechanismen, die Hydrolyse und die Oxidation.[474] Vor allem für die Oxidation liefert Licht die nötige Energie um die Bildung eines Startradikals zu ermöglichen.[475] Die Anwesenheit von Lignin im Gewebe erhöht seine Lichtsensibilität und erhöht dadurch auch die Abbaurate der Oxidation.[476]

Hackney/Hedley haben während der Alterung von Flachsgeweben im natürlichen Tageslicht unterschiedliche Filter verwendet und so gezeigt, dass die Festigkeit der Garne abnimmt, je mehr kurzwellige Anteile des Lichtes einwirken. Gleichzeitig fällt der pH-Wert kontinuierlich ab.[477]

Temperatur

Im Allgemeinen gilt, dass die Erhöhung der Temperatur einen beschleunigten Abbau mit sich bringt. Geringer werdende inter- und intramolekulare Wechselwirkungen machen die Fasern

473 Zervos 2007.
474 Klemm et al. 1998, S. 119; Bobeth 1993S. 327—328; Sommer 1956, S. 11—12.
475 Siehe Abschnitt „Oxidation der Cellulose„, S. 127.
476 Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 33 und 35.
477 Hackney/Hedley 1984.

empfindlicher gegenüber äußeren Einflüssen. Dadurch spielt die Wärme oft eine mittelbare Rolle, indem sie die Wirkung anderer Einflussgrößen wie Sauerstoff, Licht oder Feuchte verstärkt. Das gilt jedoch nur bis zu einer Temperatur von ca. 70 °C. Höhere Temperaturen können die Art der ablaufenden Reaktionen verändern, bis hin zur direkten Depolymerisation der Cellulose.[478] Andere Autoren sehen diesen Punkt erst bei 90 °C.[479] In der Regel ist unter natürlichen Alterungsbedingungen eines Leinwandgemäldes nicht mit Temperaturen über 70 °C zu rechnen, wodurch keine neuen Reaktionsabläufe zu erwarten sind. Jedoch kann es durch Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen durchaus zu einer Erwärmung des Bildträgers kommen, die 70 °C erreicht oder überschreitet. Leider existieren keine publizierten Angaben dazu, wie stark sich ein textiler Bildträger durch derartige Maßnahmen erwärmt, z. B. während einer Doublierung oder Randanstückung unter Einsatz von Wärme. Ein für die genannten Maßnahmen häufig eingesetztes synthetisches Klebemittel BEVA® benötigt beispielsweise eine Siegeltemperatur von 62—65 °C.[480]

Bei Temperaturen über 100 °C ist die Luftfeuchte nahe Null und es kommt zu einer starken Trocknung des Gewebes. Durch vermehrte Entstehung von intermolekularer Wasserstoffbrückenbindungen kommt es zu einer stärkeren Vernetzung benachbarter Celluloseketten. Dadurch verringert sich die Zugänglichkeit des Materials, wodurch sich auch die Bindungsmöglichkeit von Wassermolekülen reduziert.[481] Ob diese Effekte auch durch weniger drastische Trocknungsmaßnahmen auftreten, ist bisher nicht publiziert worden.

Hohe Temperaturen nehmen darüber hinaus Einfluss auf den morphologischen Aufbau und die übermolekulare Struktur der Cellulose. So wurde experimentell nachgewiesen, dass der Kristallinitätsgrad bis Temperaturen von 140 °C ansteigt, bei höheren Temperaturen jedoch wieder deutlich abnimmt.[482]

Wie sich die Hohlraumstruktur in Papier während einer thermischen Alterung in Abwesenheit von Feuchte verändert, wird durch ein anschauliches Modell von Kato/Cameron beschrieben (Abbildung 3.43, S. 132). Daraus wird ersichtlich, dass eindringende Feuchte im intakten Fasermaterial bestehende Wasserstoffbrückenbindungen zwischen Fibrillen aufbricht und dadurch neue und kleinere Hohlräume bildet, die mit Wassermolekülen gefüllt sind. Durch eine thermische Alterung bei 160 °C werden die Hohlräume nicht wesentlich verändert. Wird dieses gealterte Material jedoch erneut befeuchtet, können sich die Fibrillen nur noch in sehr viel geringerem Maß weiten, wodurch die Quellung insgesamt geringer ausfällt und weniger neue Hohlräume entstehen.[483] Ob sich diese im Papier vollziehenden Veränderungen auch auf Flachsgewebe übertragen lassen, ist bisher nicht untersucht worden. In der Konservierungswissenschaft wurde bisher nicht untersucht, wie sich die Hohlraumstruktur auf allen struktu-

478 Bobeth 1993, S. 324; Bansa 2002, S. 109.
479 Erhardt/Mecklenburg 1995.
480 Lascaux 2017.
481 Siehe auch S. 51ff., sowie Cardamone 2001, S. 14.
482 Roffael/Schaller 1971.
483 Kato/Cameron 1999.

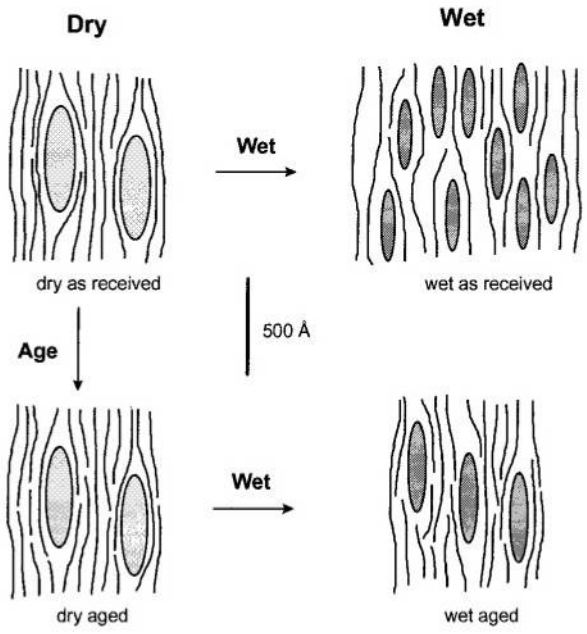


Abbildung 3.43: Veränderung der Hohlraumstrukturen in Papier durch thermische Alterung und anschließende Befeuchtung. Aus Kato/Cameron 1999, S. 1476.

rellen Ebenen im Gewebe während der Alterung verändert. Es ist jedoch zu erwarten, dass derartige Veränderungen Einfluss auf das hygrische Verhalten nehmen würden.

Feuchte

Analog zur erhöhten Temperatur gilt auch für die Feuchte, dass der Abbau umso schneller abläuft, je höher die Umgebungsfeuchte ist. Im Falle von Cellulose verläuft diese Abhängigkeit jedoch nicht linear, da die Feuchteaufnahme von Cellulose nicht linear verläuft. Die Kurve, die das Verhältnis von Degradationskonstante zu Umgebungsfeuchte beschreibt, verläuft analog zur Sorptionsisotherme: Bis zu einer relativen Feuchte von 25 % steigt die Abbaukonstante rasch an, um im weiteren Verlauf bis 75 % nur wenig anzusteigen. Noch höhere Umgebungsfeuchten lassen die Kurve wieder steil ansteigen (Abb. 3.44). Es besteht also ein linearer Zusammenhang zwischen Gleichgewichtsfeuchte und der Degradationsrate. Beim Abbau von Cellulose spielt dabei hauptsächlich die durch das vorhandene Wasser verstärkt ablaufende Hydrolyse eine Rolle.[484] Aber auch auf die Oxidation wirkt eine Erhöhung der Feuchte beschleunigend. Mobile Wassermoleküle erleichtern die Bewegung von Oxidationsmitteln (Metallionen oder freie Radikale) in die amorphen Bereiche der Cellulose, wo die Oxidation statt findet. Des Weiteren erleichtert Wasser den Transport von Sauerstoff in das Fasermaterial.[485]

484 Zou et al. 1996.
485 Whitmore 2015, S. 249.

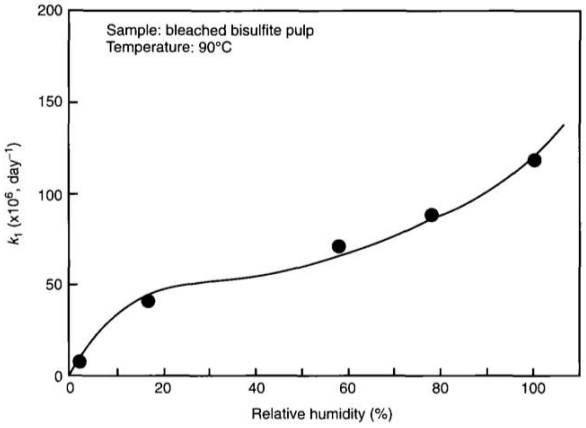


Abbildung 3.44: Degradationsrate von Cellulose (Zellstoff) in Abhängigkeit zur relativen Feuchte. Aus Zou et al. 1996, S. 253.

Dass unmittelbare, sogenannte „Wasserschäden" an der Leinwand zu einem beschleunigten Abbau führen können, ist einzelnen Beschreibungen auf der Basis von empirischen Einschätzungen zu entnehmen.[486] Konkrete Untersuchungen dazu sind jedoch nicht publiziert.
Eine starke Trocknung von Flachsfasern durch extrem niedrige Umgebungsfeuchten, lässt zwischen den Celluloseketten vermehrt Wasserstoffbrückenbindungen entstehen. Allgemein verringert sich dadurch die Zugänglichkeit des Materials, wodurch sich die Feuchteaufnahme verringert, weil Wassermoleküle weniger leicht eindringen können.[487]
Lignin trägt als Bestandteil der Mittellamelle mit seinen hydrophoben Eigenschaften dazu bei, dass den Abbau beschleunigende Substanzen weniger gut eindringen können. Diese hydrophobe Eigenschaft verliert es jedoch während der Degradation, wodurch den Abbau beschleunigende Substanzen leichter eindringen können.[488]

Wiederholtes Quellen und Schwinden

Generell verändern sich mit der Sorption und Desorption die Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den Celluloseketten im Fasermaterial. Es finden gewisse Neuordnungen statt bei gleichzeitiger Veränderung im Volumen, wodurch innere Spannungen entstehen können.[489] Wie bereits beschrieben, sind diese Neuordnungen nicht immer reversibel und wirken sich auf das anschließende hygrische Verhalten aus.[490]
An Papier wurde nachgewiesen, dass eine zyklisch schwankende Feuchte (dynamische Alterung) den Degradationsgrad gegenüber einer konstant erhöhten Feuchte noch weiter steigern kann.[491] Als Ursache vermuten Shahanani et al. neben physikalischen Ursachen auch chemische Veränderungen, vor allem eine Steigerung der Reaktivität. Durch den ständigen Feuchtewech-

486 So z. B. Haller/Hilden 2010, S. 10.
487 Cardamone 2001, S. 14.
488 Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 33.
489 Hermans 1949, S. 191; Urquhart 1960, S. 24.
490 Siehe Abschnitt „Morphologische Ebene„ S. 51.
491 Shahani et al. 1989 und Kässberger 1998.

sel wird eine Hydratation von Protonen an sauren Molekülen erleichtert. Ihre Mobilität wird erhöht, wodurch die Wahrscheinlichkeit zu einer Reaktion an den Hydroxygruppen der Cellulose steigt.[492] Darüber hinaus wurde an Papier nachgewiesen, dass eine zyklisch schwankenden Feuchte während der Alterung höhere Kristallitgrößen in der Cellulose erzeugt gegenüber einer konstant gehaltenen Feuchte.[493] Feuchte spielt also eine wesentliche Rolle für die Art und das Ausmaß der ablaufenden Degradation und das daraus resultierende hygrische Verhalten von Cellulose. Erhardt/Mecklenburg schlussfolgern aus diesem Grund, dass eine Simulation natürlicher Alterungsprozesse nur mit der unter natürlichen Bedingungen identischen Umgebungsfeuchte bei gleichzeitig erhöhter Temperatur möglich ist.[494]
Neben der erhöhten Degradation nimmt durch ein wiederholtes Quellen und Schwinden die Sorptionsfähigkeit des Fasermaterials ab.[495] Ursächlich dafür sind die Veränderungen im morphologischen Aufbau der Cellulose. Durch Sorption werden unter latenten Spannungen stehende Nebenvalenzbindungen gelöst, so dass sich Molekülkettenabschnitte verlagern und beim Trocknen stabilere inter- und intramolekulare Verbindungen ausbilden können. Das Verhältnis zwischen amorphen und kristallinen Bereichen verschiebt sich hin zu einem höhen Anteil an kristallinen Bereichen. Die Folge ist die Reduzierung jener Bereiche, die für das Eindringen von Wassermolekülen genug Flexibilität bieten.[496] Dieser Effekt wird in der Celluloseforschung als „hornification“ bezeichnet.[497]
Durch das dichtere Heranrücken der Molekülketten wird insgesamt weniger Volumen beansprucht, was durch die Erhöhung von Hohlräumen kompensiert wird. Zusätzliches freies Volumen entsteht durch das Kollabieren von Mikrokapillaren in der Zellwand, im Wesentlichen in der Sekundärwand der Elementarfaser. Die Festigkeit und Elastizität der Zellwand einer intakten Faser basiert auf einer homogenen Verteilung von amorphen und kristallinen Bereichen. Die Zunahme von Hohlräumen führt hier zu einem Ungleichgewicht und zu einer weniger flexiblen und elastischen und insgesamt schwächeren Faser.[498]

Physikalische/Mechanische Einflüsse

Untersuchungen haben gezeigt, dass Zugspannungen in Flachsfasern eine Erhöhung des Kristallinitätsgrades bewirken.[499] Es wäre interessant zu überprüfen, ob die im aufgespannten Bildträger auftretenden Zugspannungen vergleichbare Effekte bewirken und sich dadurch auf die Degradation der Leinwand auswirken. Über die Auswirkungen der im Bildträger auftretenden

492 Shahani et al. 1989.
493 Sandy et al. 2010.
494 Erhardt/Mecklenburg 1995.
495 Klemm et al. 1998, S. 49.
496 Shahani et al. 1989, S. 77; Bobeth 1993, S. 241; Kronkright 1990, S. 149—150.
497 Krässig 1993, S. 32.
498 Kronkright 1990, S. 50—51; Klemm et al. 1998.
499 Astley/Donald 2003.

Spannungen auf die Degradation ist in der Konservierungswissenschaft wenig bekannt. Leene et al. vermuten, dass sich mechanische Spannungen beschleunigend auf den Abbau, d. h. auf die Depolymerisation der Cellulose, von textilen Garnen auswirken. Sie konnten dies zwar nicht mit direkten Versuchsergebnissen belegen, stellen diese Theorie jedoch aufgrund von verschiedenen Beobachtungen auf.[500]
Dass sich die Aufspannung während der Alterung auf die Gewebegeometrie auswirkt, haben Young/Hibberd und Tost anhand der Durchführung einer künstlichen Alterung gezeigt.[501] Darüber hinaus stellte Tost fest, dass die während der Alterung aufgespannten Gewebe weniger ausgeprägte Dimensionsänderungen zeigten. Außerdem zeigten sie eine deutlich geringere Dehnbarkeit und einen geringeren Anteil der elastischen Dehnung als die ungespannten Vergleichsgewebe.[502]

3.7.3 Hygrisches Verhalten degradierter Leinwände

Ungespannte Leinwand

Der Großteil der unserem Wissen zugrundeliegenden Informationen über das hygrische Verhalten degradierter Leinwände stammt von Material, welches künstlich gealtert wurde. Dabei sind die Bedingungen der Alterung oft unterschiedlich und nur bedingt miteinander vergleichbar. Darüber hinaus basieren einige Erkenntnisse auf Untersuchungen an Cellulose aus Papier. Ob sie auf Flachsgewebe übertragbar sind, ist nicht immer nachgewiesen.
Zur Gleichgewichtsfeuchte degradierter Leinwände während Sorption und Desorption existieren nur wenige Daten. Sorptionsisothermen von historischen oder auch künstlich gealterten Flachsgeweben oder auch -garnen sind eine Seltenheit. Für historisches Fasermaterial ist nur ein publiziertes Beispiel bekannt (Abb. 3.45, S. 136).[503] Der Vergleich eines neuen und eines historischen Flachsgarnes aus dem 16. Jh. lassen erkennen, dass der prinzipielle Verlauf der Isothermen sehr ähnlich ist. Der Unterschied besteht jedoch in der Höhe der Gleichgewichtsfeuchte, welche für das degradierte Garn niedriger lag. Darüber hinaus unterschieden sich die Garnproben in der Zeit, wie schnell die Gleichgewichtsfeuchte erreicht wurde (Tab. 3.16). Demnach erreichte das historische Garn die Gleichgewichtsfeuchte etwas schneller. Leider liegen zu den degradierten Garnen keine Information zur Art der Alterung und zum Grad der Degradation vor.

500 Leene et al. 1975, S. 75/10/2-7.
501 Young/Hibberd 1999a, Tost 2005.
502 Tost 2005, S. 45—51 und 60—65.
503 Wyeth 2005, S. 141.

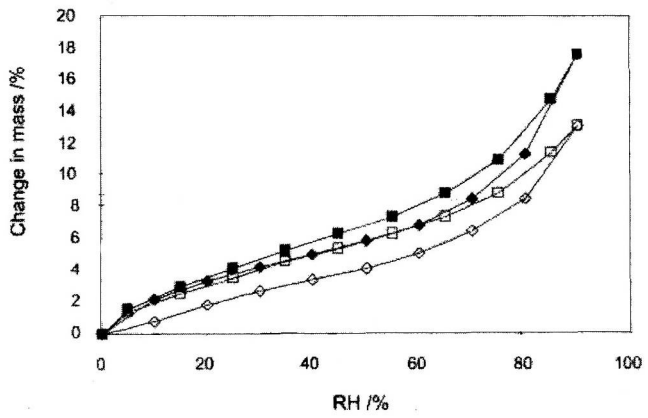


Abbildung 3.45: Sorptionsisotherme eines neuen und eines historischen (16. Jh.) Flachsgarnes aus Wyeth 2005, S. 141.

Dort keine Angabe zur Temperatur. Schwarze Symbole: neues Flachsgarn, helle Symbole: Flachsgarn 16. Jh. Diamant: Adsorption, Quadrat: Desorption.

Tabelle 3.16: Gleichgewichtsfeuchte bei 90 %rF gemessen jeweils an einem 2 cm langen Garnabschnitt. Daten aus Wyeth 2005, S. 141. Dort keine Angaben zur Temperatur.

Garnprobe	**Gleichgewichtsfeuchte [%] ± 0,5 %**	**Zeit bis zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte [s]**
Flachs neu	17,7	1127
Flachs Wärme gealtert	15,6	1137
Flachs historisch, 16. Jh.	13,1	1003

An der HfBK Dresden wurden Sorptionsisothermen an neuen und künstlich gealterten Leinwänden erfasst. Die künstliche Alterung beinhaltete das Tränken in Kaliumpermanganat mit anschließendem Neutralisieren in einem Säurebad. Die Ergebnisse für den Feuchtezuschlag sind in Tab. 3.17 zusammengefasst.

Beide Untersuchungen bestätigten die Abnahme der Sorptionsfähigkeit der Leinwände im Zuge der Degradation.

Tabelle 3.17: Gleichgewichtsfeuchte zweier Leinwände neu und degradiert. Daten bei 94 %rF aus Dick 2006, S. 35—36 bzw. Neufert 2006, S. 82. Daten bei 96 %rF aus Bennke 2007, S. 65.

Gewebeprobe	**Gleichgewichtsfeuchte [%] bei 94 %rF**	**Gleichgewichtsfeuchte [%] bei 96 %rF**
Leinwand D, neu	17,17	24,1
Leinwand D, degradiert	15,59	21,62
Leinwand L, neu	21,34	20,63
Leinwand L, degradiert	17,83	20,51

Diesen Ergebnissen steht eine Untersuchung gegenüber, die an Flachsfasern eine Zunahme der Gleichgewichtsfeuchte nach der Alterung feststellte. Die Alterung erfolgte über sechs Sommermonate an der italienischen Außenluft, ohne Regen, bei hohen Temperaturen, hoher Feuchte und Sonne. Die Werte des Feuchtezuchlags sind in Tab. 3.18 zusammengefasst. Die Autoren schlussfolgern aus diesen Ergebnissen, dass die Kristallinität des Materials im Zuge der Alterung abgenommen hat, wodurch mehr amorphe Bereiche für die Aufnahme von Feuchte zur Verfügung stehen. Diese Vermutung wurde jedoch nicht mit Messungen der Kristallinität belegt.[504] Dies widerspricht den bisher zusammengefassten Ergebnissen, die einheitlich davon ausgehen, dass die Kristallinität im Zuge der Alterung zunimmt.

Tabelle 3.18: Feuchtezuschlag bei 18 °C / 34 %rF für neuen und gealterten Flachs. Die Proben wurden vor der Messung bei 70 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Aus Princi *et al. 2005, S. 372.*

Probe	**Feuchtezuschlag [%] gemessen nach 24 h**	**Feuchtezuschlag [%] gemessen nach 120 h**
Nicht gealterter Flachs	2,40	3,25
Gealterter Flachs	2,67	3,41

Eine weitere Untersuchung hatte den Vergleich mehrerer Sorptionsisothermen neuer und gealterter Garne zum Gegenstand.[505] Dabei wurde eine Veränderung im Verlauf der Isotherme nach der Alterung festgestellt. Die gealterten Garne nahmen im Vergleich zu den neuen Garnen im mittleren Bereich der Umgebungsfeuchte (um ca. 65 %rF) weniger Feuchte auf, während sie in den hohen Bereichen (um ca. 99 %rF) mehr Feuchte aufnahmen. Gleichzeitig wurde gemessen, dass sich die Dichte der Garne erhöhte. Beide Phänomene zeigen, dass sich durch die Alterung strukturelle Veränderungen im Garn vollziehen, die sich auf deren hygrisches Verhalten auswirken. Leider sind die einzelnen Isothermen dieser Studie nicht publiziert und deren Auswertung nur in kurzer Form zusammengefasst, sodass detaillierte Interpretationen an dieser Stelle nicht möglich sind.

Ebenso wie es kaum Daten zur Gleichgewichtsfeuchte gibt, existieren kaum Daten über Dimensionsänderungen degradierter Leinwände aufgrund von Sorption und Desorption. Eine Untersuchung beschäftigte sich mit Dimensionsänderungen von degradierten Leinwänden nach einer vollständigen Durchnässung mit deionisiertem Wasser. Die Dickenzunahme zweier Gewebe lag bei 10,6 % bzw. 35 %. Weil jedoch die Dickenzunahme nur in einem Fall mit der Zunahme des Garndurchmessers übereinstimmte, wurde die Dickenzunahme im anderen Gewebe mit der Veränderung der Welligkeit des Gewebes erklärt.[506]
Eine weitere Untersuchung zeichnete Dimensionsänderungen durch wechselnde Umgebungsbedingungen an ungespannten, degradierten Leinwänden auf. Die von Mager künstlich gealterten, ungespannten Leinwände zeigten prinzipiell das gleiche Schrumpf- und Ausdehnungs-

504 Princi et al. 2005, S. 371.
505 Leene et al. 1975, S. 75/10/2-9.
506 Cooke et al. 1996, S. 11—13.

verhalten wie die entsprechend ungealterten Gewebe, lediglich war das Ausmaß der Dimensionsänderungen geringer. Die künstliche Alterung beinhaltete eine dynamische Alterung, bei der die Umgebungsfeuchte zyklisch schwankte. Insofern waren die untersuchten Gewebe in hohem Maß wiederholten Quellungen und Schrumpfungen ausgesetzt.[507]

Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften

Nicht degradiertes Flachsgewebe erhöht seine Festigkeit, wenn seine Gleichgewichtsfeuchte steigt.[508] Dieser Effekt nimmt mit der Degradation des Materials ab.[509] Darüber hinaus existiert das Modell, dass mit steigender Gleichgewichtsfeuchte bei Flachsfasern Glasübergangstemperatur und Elastizitätsmodul sinken, wodurch sich das Material dem visko-elastischen Bereich annähert.[510]
Einen Nachweis, dass die Festigkeit degradierter Gewebe bei hohen Gleichgewichtsfeuchten abnimmt, erbrachten Cooke et al. Sie erklärten das Verhalten von degradierten Flachsgeweben durch einen Vergleich mit Viskose. Viskose weist einen niedrigen Polymerisationsgrad auf, bei gleichzeitigem hohen Anteil an amorphen Bereichen. Bei erhöhter Materialfeuchte weiten sich die amorphen Bereiche und die kurzen Ketten können leicht aneinander vorbei gleiten. Dadurch nimmt ihre Festigkeit bei steigender Materialfeuchte ab. Degradierte Flachsgewebe nähern sich durch den sinkenden DP diesem Verhalten der Viskose an.[511] Die Rolle der ansteigenden Kristallinität in Flachsgeweben, die einen gegenteiligen Effekt hat, wird in diesem Modell nicht berücksichtigt.

Die Nassfestigkeit von degradiertem Flachsgewebe und seine Dehnbarkeit spielt in der Konservierungstechnik eine wichtige Rolle. Eine übliche Vorgehensweise, um geschrumpfte Gewebebereiche zu dehnen, beinhaltet das vorhergehende Befeuchten dieses Bereiches.[512] Weil es jedoch kaum Untersuchungen zur Nassfestigkeit und -dehnbarkeit von degradierten Flachsgeweben gibt, basiert die praktische Durchführung in Bezug auf die Intensität und die Dauer der Befeuchtung auf Erfahrungen und empirischen Beobachtungen des Restaurators, sowie der präzisen Beobachtung des Objektes.
Um die Dehnung des degradierten Bildträgers besser beurteilen zu können, sind verschiedene Seminararbeiten an der HfBK Dresden unter der Betreuung von Heiber durchgeführt worden. Aus diesen Untersuchungen geht hervor, dass die Dehnbarkeit von Flachsgeweben bei einer Umgebungsfeuchte von 75 %rF tendenziell mit der Degradation abnimmt.[513] Solche Gewebe,

507 Mager 2007, S. 69—70. Das Verhalten der ungealterten Gewebe ist in Abschnitt „Dimensionsänderungen des Gewebes„ S. 88ff. beschrieben.
508 Siehe auch Abschnitt „Feuchteeinfluss auf die physikalischen Eigenschaften des Gewebes„ S. 92ff.
509 Smith 1991.
510 Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 276.
511 Cooke et al. 1996, S. 10.
512 Thieme-Hess 1999, S. 61; Heiber 2006.
513 Dick 2006, S. 54—55.

die während der künstlichen Alterung gespannt waren, wiesen eine deutlich geringere Dehnbarkeit auf gegenüber jenen, die während der Alterung nicht gespannt waren. Im Vergleich der absoluten Werte der elastischen Dehnung zeigten sie auch hier geringere Werte als die ungespannten Vergleichsgewebe. Jedoch war ihr Anteil der elastischen Dehnung bezogen auf ihre jeweilige Gesamtdehnung höher.[514]
Auch der Kontakt mit flüssigem Wasser kann Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften des degradierten Gewebes nehmen. Experimente an degradierten Flachsgeweben zeigten, dass schon eine einzige Durchnässung mit deionisiertem Wasser irreversible Veränderungen der Festigkeit zur Folge haben kann. Im Vergleich zu neuen Geweben wurden an degradierten Flachsgeweben sowohl höhere als auch niedrigere Werte für die Festigkeit gemessen, was neben der Abnahme des DP auch mit Veränderungen der Kristallinität erklärt wurde.[515] Andere Autoren vermuten, dass während der durch Sorption hervorgerufenen Quellung in gespannten Geweben so hohe Spannungen auftreten, dass es zu Brüchen innerhalb der bereits degradierten Fasern kommen kann. Experimentell wurde dies jedoch nicht direkt nachgewiesen.[516]

Gespannte Leinwand

Zum Verhalten der degradierten Leinwand im aufgespannten Zustand, ohne aufliegende Schichten im Sinne von Vorleimung, Grundierung und Malschicht, existieren in der Konservierungswissenschaft kaum publizierte Studien.
Untersuchungen an der HfBK Dresden zeigten an frei hängenden Gewebestreifen, die mit einem leichten Gewicht beschwert waren, dass sich degradierte Gewebe bei Sorption ausdehnten und bei hohen Umgebungsfeuchten schrumpften.[517] Sie veränderten in dieser Studie nicht ihr grundsätzliches Verhalten gegenüber den ungealterten, dekatierten Geweben.
Tost beobachtete bei gleicher Versuchsanordnung an degradierten Geweben während der Sorption ebenfalls ein Ausdehnen, jedoch verzeichnete sie Unterschiede welche Gewebe bei hohen Umgebungsfeuchten schrumpften. Es waren nur jene Gewebe, die während der künstlichen Alterung aufgespannt waren.[518] Die degradierten Gewebe zeigten bei allen genannten Untersuchungen insgesamt ein geringeres Ausmaß der Größenänderungen als die neuen Gewebe.
Genau wie bei ungealterten Geweben scheint die Gewebegeometrie und die auf die Fäden einwirkenden Kraft einflussgebend auf das Dimensionsverhalten von gespannten degradierten Geweben zu sein.[519]
Untersuchungen zum Verhalten degradierter Gewebe in biaxialer Aufspannung sind in der konservierunswissenschaftlichen Literatur nicht publiziert.

514 Tost 2005, S. 60—67.
515 Cooke et al. 1996, S. 10—11.
516 Leene et al. 1975, S. 75/10/2-10.
517 Dick 2006, S. 46; Neufert 2006, S. 46—47; Bennke 2007, S. 41.
518 Tost 2005, S. 46—51.
519 Vrgl. Abschnitt „Gespannte Leinwand„ S. 95.

Leinwandgemälde

Die in der Konservierungswissenschaft publizierten Studien über das Verhalten degradierter Leinwände mit aufliegenden Schichten im Sinne von Vorleimung, Grundierung und Malschicht wurden alle an historischen Materialien des 19. und 20. Jhs. durchgeführt, deren Alterungsbedingungen und Zusammensetzung nur bedingt bekannt waren. An diesen Materialien wurden zumeist Beobachtungen hinsichtlich ihrer Dimensionsänderungen in Form von Spannungsänderungen im gespannten Zustand gemacht. Es existieren jedoch kaum Daten zur Erfassung der Materialfeuchte der einzelnen degradierten Filme von Vorleimung, Grundierung und Malschicht, die sich in unterschiedlicher Kombination und Schichtdicke auf dem Bildträger befinden. Ebenso mangelt es an Daten über die Reaktionen der besagten Schichten auf wechselnde Umgebungsfeuchten. Mit Hilfe solcher Daten könnte das beobachtete Verhalten der untersuchten Gemälde präziser interpretiert werden.

Hedley erfasste die Gleichgewichtsfeuchte einer historischen, gewerblich grundierten Hinterspannungsleinwand. Die von ihm aufgezeichnete Sorptionsisotherme ist in Abb. 3.46 dargestellt. Er berechnete aus seinen Messdaten die absolute Masse an Feuchte, die ein 60 x 90 cm großes Stück dieser grundierten Leinwand aufnehmen würde (Tabelle 3.19).[520] In einer anderen Studie wurden Proben dieser identischen Hinterspannungsleinwand mittels dielektrischer Analyse untersucht. Dabei zeigte sich, dass sie während einer partiellen Befeuchtung eine schnellere Feuchteaufnahme zeigte und auch absolut am meisten Feuchte aufnahm im Vergleich zu zwei neueren Probestücken. Diese beiden Vergleichsstücke wiesen zwar grundsätzlich andere Zusammensetzungen auf, das Ergebnis ist aber dennoch ein Beispiel, dass die allgemeine Annah-

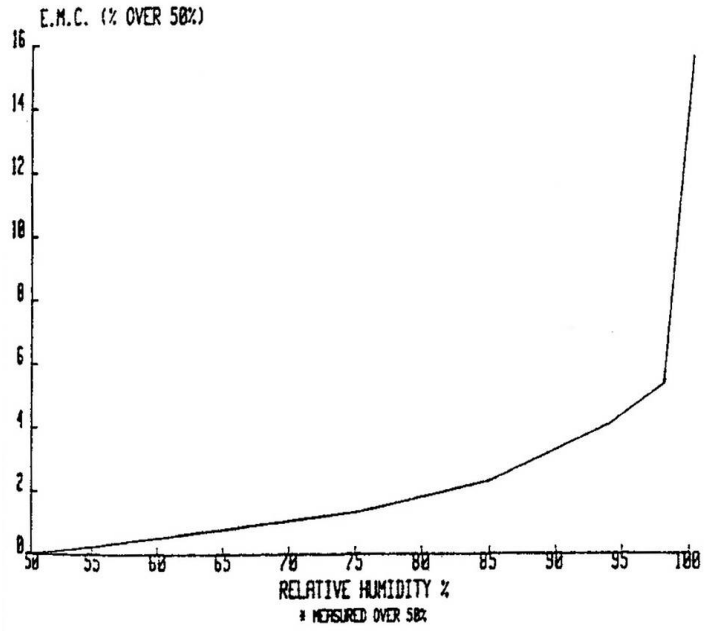


Abbildung 3.46: Gleichgewichtsfeuchte eines gewerblich grundierten Gewebes, datiert ca. 1868. Aus Hedley 1993, S. 116.
Die Gleichgewichtsfeuchte bezieht sich auf das Gewicht bei 50 %rF.

520 Hedley 1993, S. 116.

me, der Bildträger nimmt im Zuge seiner Alterung an Feuchteaufnahme ab, nicht zwangsläufig bedeutet, die Feuchteaufnahme degradierter Gemälde ist generell niedriger als nicht gealterte Gemälde. Die Gleichgewichtsfeuchte war nach ca. 30 Minuten erreicht.[521]

Tabelle 3.19: Berechnete Menge der aufgenommenen Feuchte für eine grundierte Leinwand der Größe 60 x 90 cm. Daten aus Hedley 1993, S. 116.

Der Berechnung liegen die experimentell gemessenen Werte aus Zeile 1 zugrunde (siehe auch Abb. 3.46). Die Werte beziehen sich auf die Gleichgewichtsfeuchte bei 50 %rF eines ca. 1868 grundierten Leinwandstreifens.

Relative Feuchte	**75 %**	**85 %**	**98 %**	**100 %**
Experimentell bestimmte Feuchteaufnahme in Bezug auf				
Gleichgewichtsfeuchte bei 50 %rF	1,3 %	2,3 %	5,3 %	15,5 %
Prognostizierte absolute Masse aufgenommener Feuchte für 60 x 90 cm	4,4 g	7,8 g	18 g	53 g

Weitere Daten zur Materialfeuchte erzeugten Odlyha et al. durch die Erhitzung ihrer Proben auf 200 °C und des daraus ermittelten Gewichtsverlustes (thermogravimetrische Analyse). Einer vorgeleimten, grundierten (auf Öl basierend) Leinwand, welche künstlich gealtert war, konnte auf diese Weise drei Werte für die Gleichgewichtsfeuchte zugeordnet werden (siehe Tabelle 3.20).[522] Die Daten der Gleichgewichtsfeuchte, die durch eine Trocknung bei sehr hohen Temperaturen ermittelt wird, sind nicht vergleichbar mit Werten einer Gleichgewichtsfeuchte die im Rahmen einer Sorptionsisotherme erfasst wird.

Tabelle 3.20: Gleichgewichtsfeuchte einer vorgeleimten, grundierten (auf Öl basierende Grundierung) Leinwand, künstlich gealtert. Aus Odlyha et al. 1996, S. 301.

Relative Feuchte [%]	60	85	90
Gleichgewichtsfeuchte [%]	2,7	3,7	5,3

Wie der Verlauf der Feuchteaufnahme im Gemälde stattfindet, war Gegenstand der Untersuchungen von Odlyha et al. Über die Messung der Leitfähigkeit wurde an zwei unterschiedlich beschichteten Leinwänden gezeigt, dass die Aufnahme von Feuchte in einer annähernd linearen Weise verläuft. Die Trocknung hingegen verlief tendenziell schneller und sprunghafter.[523] Aufgrund der fehlenden Informationen über die jeweilige Zusammensetzung der Proben bzw. den Grad der Degradation können diese wenigen Daten kaum verallgemeinert werden, sie sind jedoch beispielhaft für eine grundlegende Auseinandersetzung mit dem hygrischen Verhalten von Leinwandgemälden. Für die Interpretation des hygrischen Verhaltens fehlen in der Forschung mehr Daten über die jeweilige Gleichgewichtsfeuchte der einzelnen Materialien und auch in ihrer Kombination. Schon Schaible wies darauf hin, dass die durch ein Gemälde aufgenommene Feuchte nicht nur die Summe der Feuchte der einzelnen Schichten ist. Durch Wasse-

521 Chan et al. 1995, S. 15—16.
522 Odlyha et al. 1996, S. 301.
523 Odlyha et al. 1996, S. 300—301.

reinlagerung an Grenzflächen zwischen den einzelnen Schichten kann sich die Menge der sorbierten Feuchte erhöhen.[524]

Im Allgemeinen geht man davon aus, dass die auf dem Bildträger befindlichen Schichten im Laufe ihrer Alterung spröder werden, sich in vielen Fällen Risse in den ursprünglich einheitlichen Filmen bilden, wodurch sie andere mechanische Eigenschaften aufweisen. Für eine Kollagen basierte Vorleimung bedeutet das, dass ihre ursprünglich versteifende Wirkung auf das Gewebe im Laufe der Degradation abnimmt.[525] Obwohl ölhaltige Malschichten im Laufe der Degradation hydrophiler werden,[526] scheint ihr Einfluss auf das Verhalten der Leinwand insgesamt abzunehmen. Durch eine ausgeprägte Rissbildung kann sich die Leinwand wieder ihrem ursprünglichen Verhalten in Bezug auf wechselnde Umgebungsbedingungen annähern.[527]
Bezüglich der Rissbildung in der Malschicht machte Roche die Beobachtung, dass sich das prinzipielle Verhalten des Leinwandgemäldes nicht verändert, lediglich verringert sich die Höhe der Spannung, die das Leinwandgemälde während des Versuchs aufbaut (vrgl. Abb. 3.39, S. 122 dort: ungealtertes Leinwandgemälde).[528]

Zum hygrischen Verhalten von pigmentierten Ölfilmen, unterschiedlichen Alters, erfasste Mecklenburg diverse Daten. Seine getesteten 10 bis 20 Jahre alten Farbfilme zeigten insgesamt geringe Dimensionsänderungen bei wechselnden Umgebungsfeuchten. Prinzipiell dehnten sich diese Filme bei steigender Umgebungsfeuchte aus und schrumpften während der Desorption.[529] Insgesamt wurden sie mit Erhöhung der Umgebungsfeuchte flexibler.[530] Dieses Verhalten wurde auch von anderen Autoren durch die Bestimmung der Glasübergangstemperatur (T_G) an 17 Jahre alten Farbfilmen bestätigt. Die T_G nahm mit steigender Umgebungsfeuchte ab.[531] Untersuchungen zu stärker degradierten Farbfilmen wurden bisher nicht publiziert.
Mecklenburg untersuchte darüber hinaus ein Fragment eines Gemäldes von Duncan Smith, welches auf 1906 datiert wird. Es bestand aus einer Leinwand, Vorleimung, Grundierung aus Öl und Bleiweiß und einer Öl gebundenen Malschicht. In uniaxialer Aufspannung dehnt sich das Gemälde bei Befeuchtung aus und schrumpft bei sehr hohen Werten der Umgebungsfeuchte (Abb. 3.47). Nach Mecklenburg ist für die Schrumpfung während der Desorption die Vorleimung verantwortlich. Für die Schrumpfung während der Sorption in sehr hohen Umgebungsfeuchten hingegen ist das Gewebe verantwortlich.[532]

524 Schaible 1990, S. 247.
525 Outhwaite 1993.
526 Ackroyd 2002, S. 9.
527 Russell/Berger 1982, S. 144.
528 Roche 2005, S. 203.
529 Mecklenburg 2005, S. 129—130 und 145.
530 Mecklenburg 2005, S. 140.
531 Odlyha et al. 1995.
532 Mecklenburg 2005, S. 148—149.

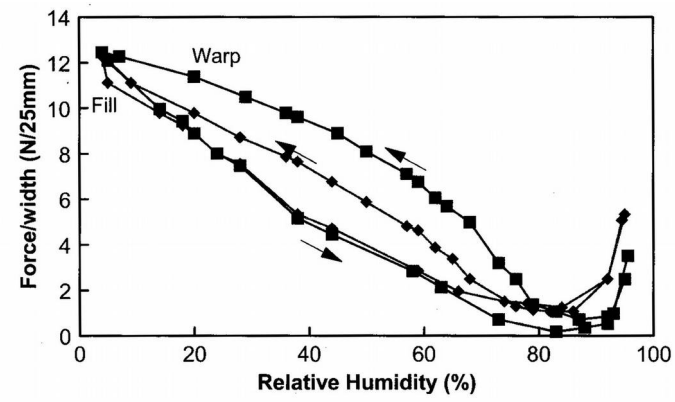


Abbildung 3.47: Verhalten einer Probe aus dem Gemälde von Duncan Smith, 1906. Dimensionsänderungen in uniaxialer Aufspannung. Aus Mecklenburg *2005, S. 149.*

Das von Mecklenburg beobachtete prinzipielle Verhalten wurde durch Untersuchungen von Hedley bestätigt, der neben natürlich gealterten grundierten Leinwänden des 19. Jhs. auch Gemäldefragmente der gleichen Zeit testete, u. a. auch ein Fragment des identischen Gemäldes, welches Mecklenburg bereits untersuchte. Bei den fünf von Hedley untersuchten historischen Proben handelt es sich um Leinwände, die jeweils entweder Vorleimung, Grundierung und Malschicht aufwiesen. Es wurde keine unbehandelte Leinwand untersucht.[533] Eine von Bilson untersuchte ungespannte historische Hinterspannungsleinwand zeigte das gleiche Verhalten: Bei steigender Umgebungsfeuchte dehnte sich die Leinwand leicht aus und begann bei ca. 86 %rF zu schrumpfen.[534]

Hedley belegte zwar das von Mecklenburg beschriebene Verhalten mit verschiedenen originalen Materialien, jedoch scheint es sich um ein relativ einseitiges Probenmaterial zu handeln. Es darf in Frage gestellt werden, ob diese Proben aus dem 19. Jh. als allgemeingültiges Modell für das generelle Verhalten eines Leinwandgemäldes gelten darf. Die Vielfalt der Herstellungstechniken von Gemälden bleibt dabei ungeachtet.

Hedley analysierte in seinen Untersuchungen jenen Punkt bei hohen Umgebungsfeuchten etwas genauer, an dem das Gemälde beginnt zu schrumpfen. Insgesamt variieren die Werte, ab wann das Gewebe beginnt zu schrumpfen zwischen 78—85 %rF. Nach mehreren Zyklen der Be- und Entfeuchtung verzeichnet er in den Reaktionen der Leinwand eine Verschiebung jenes Punktes, bei dem das Schrumpfen der Leinwand einsetzte in höhere Bereiche der Umgebungsfeuchte.[535] Wenn man diesem Verhalten die Theorie zugrunde legt, dass sich durch wiederholtes Quellen und Schwinden das freie Volumen insgesamt erhöht,[536] kann damit der später einsetzende Quellungsschrumpf erklärt werden, weil mehr Volumen zur Verfügung steht, welches zunächst gefüllt werden muss, bevor die Quellung im Faserquerschnitt in der Vergrößerung des Garnquerschnitts sichtbar wird. Vergleicht man jene Untersuchungen, die bei hohen Umgebungsfeuchten das Schrumpfen des Materials beobachteten hinsichtlich dem Punkt, wann die-

533 Hedley 1988.
534 Bilson 1996, S. 249.
535 Hedley 1988, S. 89—90.
536 Siehe Abschnitt „Wiederholtes Quellen und Schwinden„ S. 133f.

ser Schrumpf eintritt, wird erkennbar, dass dieser Punkt nicht genau zu definieren ist. Er variiert zwischen 65 %[537] und über 90 %rF[538]. Die Ursache liegt vermutlich im Charakter der verwendeten Materialien und dem Aufbau der geprüften Gemälde, sowie der Versuchsanordnung, also die Art der Aufspannung der Prüfkörper und nicht zuletzt in der Präzision zur Messung der Umgebungsfeuchte, die als Bezugsgröße für den einsetzten Schrumpf angegeben wurde.
Über das beschriebene Verhalten hinaus beobachtete Hedley einen Initialzyklus bei drei der insgesamt neun historischen Proben, in dem sich die Proben gegensätzlich verhielten: sie schrumpften bei Befeuchtung und dehnten sich während der Trocknung wieder aus. Laut Hedley verhalten sich Gewebe auf diese Weise, bis sie zum ersten mal eine Umgebungsfeuchte von 80 %rF überschritten haben. Dann entstehen im Gewebe aufgrund der dort wirkenden hohen Kräfte, Veränderungen in der Gewebegeometrie, wodurch sie ihr anschließendes Verhalten verändern.[539]

Lipinski führte Untersuchungen zu den Dimensionsänderungen zweier Gemälden des 20. Jhs. in biaxialer Aufspannung durch. Ein Gemälde zeigte eine dichte Leinwand mit einer Grundierung auf der Basis von Öl und Protein und einer auf Öl basierten Malschicht. Ob das Gewebe vorgeleimt wurde, ist nicht gesichert. Eine warm aufgetragene Vorleimung wurde jedoch aufgrund verschiedener Indizien angenommen. Das so aufgebaute Gemälde dehnte sich während der Befeuchtung aus, und schrumpfte bei Desorption (Abb. 3.48).
Der Bildträger des zweiten untersuchten Gemäldes war ein Mischgewebe aus Flachs und Baumwolle. Die Netzleinwand zeigte typische Zwischenräume zwischen den Fäden, die durch eine kalt aufgespachtelte Vorleimung auf Stärkebasis geschlossen wurden. Die Grundierung basierte auf Öl und Protein, die Malschicht auf Öl. Diese Gemälde zeigte gegenteiliges Verhalten zu dem oben genannten Vergleichsobjekt: es schrumpfte bei Sorption und dehnte sich während der Desorption aus. Einen Umkehrpunkt im Verhalten bei hohen Umgebungsfeuchten, wie es Mecklenburg und Hedley beobachteten, zeigte keins der untersuchten Gemälde. Bei Kontakt mit flüssigem Wasser schrumpften beide Gemälde deutlich und erschlafften im Anschluss. Nach dem Kontakt mit flüssigem Wasser kehrte sich nur das Verhalten des Gemäldes mit der Netzleinwand und kalt aufgespachtelter Vorleimung um (Abb. 3.48).
Beide Gemälde wiesen einen unterschiedlichen Aufbau auf, womit auch das gegensätzliche Dimensionsverhalten erklärt wurde: Eins entspricht dem Verhalten eines vorgeleimten Gewebes, was im Verhalten von den Reaktionen des Leimes bestimmt wird, das anderen zeigt die Reaktionen des reinen, ungeleimten Gewebes.[540]

537 Young/Ackroyd 2001.
538 Bennke 2007, S. 41.
539 Hedley 1988, S. 91.
540 Lipinski 2010, S. 49—50; 70—71; 78; 84—85.

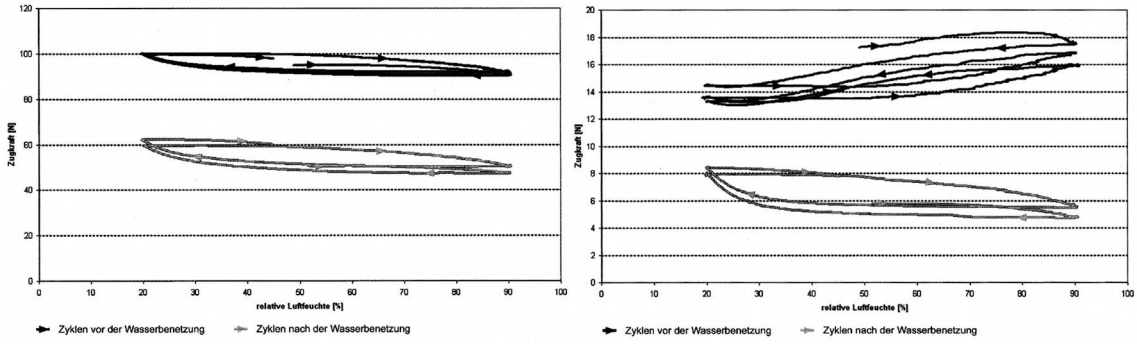


Abbildung 3.48: Historische Gemäldeproben in biaxialer Aufspannung aus Lipinski 2010, S. 153, 157.
Links: Warm vorgeleimtes Gewebe mit Grundierung und Malschicht: Gemälde dehnt sich bei Befeuchtung aus und schrumpft bei Desorption. Rechts: Netzleinwand mit kalt gespachtelter Vorleimung: Gemälde schrumpft bei Sorption und dehnt sich bei Desorption aus. Dieses Verhalten kehrt sich nach der Benetzung mit Wasser um (untere Kurve).

Berger/Russell untersuchten eine historische grundierte (auf Öl basierende Grundierung) Hinterspannungsleinwand aus dem 19. Jh. und verschiedene Gemälde des 20. Jhs., deren Aufbau mit Vorleimung und einer auf Öl basierenden Malschicht beschrieben wurden, in biaxialer Aufspannung. Alle Objekte dehnten sich bei Befeuchtung aus und Schrumpften während der Desorption. Die Umgebungsfeuchte betrug maximal 65 %rF.[541]
Berger/Russell entfernten von einem historischen Gemälde die Grundierung und Malschicht und beobachteten im Vergleich zum bemalten Gemälde, dass sich die „abgekratzte" Leinwand prinzipiell gleich verhielt, die Dimensionsänderungen in Form von Spannungsänderungen jedoch in den Übergängen gradueller auftraten. Das bemalte Gemälde hingegen zeigte abruptere und Sprunghaftere Spannungsänderungen. Die Autoren schlussfolgern daraus, dass bemalte Leinwände auch auf relativ kleine Änderungen der Umgebungsbedingungen mit abrupten Spannungsänderungen reagieren.[542] Beide Proben zeigten als Reaktion auf sehr hohe Umgebungsfeuchten von ca. 90 %rF deutliches Schrumpfen. Die abgekratzte Leinwand zeigte dabei eine stärkere Schrumpfung als die Probe mit Malschicht. Die Autoren schlussfolgern, dass die Malschicht die Leinwand in ihrer Bewegung einschränkt und maßgeblich durch ihre Schichtdicke Einfluss auf die Dimensionsänderungen des Leinwand nimmt.

Young/Ackroyd beobachteten während biaxialer Prüfbedingungen ebenfalls an historischen Gemäldeproben, dass diese sich ausdehnten, sobald die Umgebungsfeuchte von 5—55 %rF stieg. Eine weitere Befeuchtung bis 65 %rF verursachte bei einem Teil der Gemälde ein weiteres Ausdehnen, bei einem anderen Teil der Gemälde jedoch ein Schrumpfen. Die Autoren führen dieses unterschiedliche Verhalten auf die Fadenzahl im Gewebe zurück. Die schrumpfenden Gemälde wiesen eine höhere Fadenzahl in der Leinwand auf, wodurch sich die Faserquellung früher durch das Schrumpfen des Gewebes bemerkbar macht.[543]

541 Berger/Russell 1986, S. 61—63; Berger/Russell 1988, S. 202; Berger/Russell 1994, S. 76.
542 Berger/Russell 1994, S. 76—77.
543 Young/Ackroyd 2001, S. 94—95 und 99.

Auch Andersen verzeichnete innerhalb einer Gruppe von Dänischen Gemälden des 19. Jhs. diese beiden Verhaltensmuster, die Young/Ackroyd beobachteten. Sie führte ihre Versuche an kleinen Stücken des Spannrandes durch in uniaxialer Aufspannung.[544]

Allen Untersuchungen ist gemein, dass das Dimensionsverhalten während der Sorption und Desorption durch die Degradation nicht grundsätzlich verändert wird, sondern eher das Ausmaß der Dimensionsänderungen verändert wird. Einflussgebend scheinen, wie auch beim nicht degradierten Gewebe, die Gewebegeometrie, die auf die Fäden wirkende Kraft und darüber hinaus auch die Beschichtungen in Form von Vorleimung, Grundierung und Malschicht einflussgebend zu sein.

Weil die genannten Untersuchungen auf der Beobachtung von historischem Material basieren, kann deren Zusammensetzung und Aufbau nur bis zum einem gewissen Grad analysiert werden. Das Maß der Degradation wurde leider nicht bestimmt. Außerdem repräsentieren die gewählten Zusammensetzungen der Gemälde nur einen kleinen Ausschnitt der künstlerischen Techniken.

Die Dimensionsänderungen, die der textile Bildträger aufgrund von wechselnden Umgebungsfeuchten zeigt, können durch seine Aufspannung und der aufliegenden Schichten in Form von Grundierung und Malschicht zu Deformationen führen. Sind Grundierung und Malschicht nicht flexibel genug, um die Bewegungen des Bildträgers auszugleichen, kann dies zu Rissen in Grundierung und Malschicht führen.

3.7.4 Zusammenfassung

Oxidation und Hydrolyse sind hauptsächlich dafür verantwortlich, dass sich die Cellulose in der Leinwand während der Alterung chemisch verändert. Daraus resultiert die Abnahme ihres Polymerisationsgrades und die Erhöhung der Kristallinität, sowie eine Abnahme der durchschnittlichen Kristallitgröße.
Während die Abnahme des Polymerisationsgrades für Leinwände experimentell in unterschiedlichen Studien belegt wurde, ist die Veränderung der Kristallinität bisher nur unzureichend an Leinwänden untersucht worden. Bezüge beider Parameter zur Sorption von Feuchte sind bisher nicht für Leinwände publiziert worden. Die Erhöhung der Kristallinität wird jedoch als Ursache gesehen, dass sich die Sorptionsfähigkeit während der Alterung reduziert. Die Einflüsse von DP und Kristallinität können daher bisher nur auf theoretischer Ebene beurteilt werden.
Wie sich die Hohlräume auf allen strukturellen Ebenen der Leinwand (Elementarfaser, technische Faser, Garn und Gewebe) im Zuge der Alterung verändern, ist an der Leinwand bisher nicht untersucht worden. Es existieren jedoch Hinweise, die einen Einfluss auf die Aufnahme

544 Andersen 2013, S. 44.

von Wassermolekülen vermuten lassen, der jedoch bisher nicht direkt nachgewiesen wurde. In diesem Zusammenhang ist auch zu berücksichtigen, dass die Spannung der Leinwand auf diese Hohlraumstruktur Einfluss nimmt. In wenigen Untersuchungen ist bisher eingeflossen, ob und wie stark ein Gewebe während der Alterung gespannt war. Einzelne Hinweise lassen jedoch vermuten, dass ein Einfluss auf das hygrische Verhalten der Leinwand vorhanden ist.

Generell wird davon ausgegangen, dass sich die Sorptionsfähigkeit der Leinwand mit Zunahme der Degradation verringert. Die bisher gemessenen Daten zu Gleichgewichtsfeuchten degradierter Leinwände sind jedoch nicht besondern umfangreich bzw. systematisch. Auch die Dimensionsänderungen werden in reduziertem Maß erwartet. Mit experimentellen Daten ist dies bisher nur vereinzelt belegt worden. Aus der abnehmenden Sorptionsfähigkeit und verringerten Dimensionsänderung kann nicht abgeleitet werden, dass degradierte Leinwände generell weniger Feuchte aufnehmen als neue, wenn ihr ursprüngliches hygrisches Verhalten unbekannt ist.

Die Tatsache, dass schon eine einzige Behandlung eines Gewebes mit Feuchtigkeit die Struktur des Materials irreversibel verändert und die Erhöhung der Gleichgewichtsfeuchte den Abbau der Leinwand beschleunigt, macht es so bedeutsam, Feuchte so gezielt wie möglich am Bildträger einzusetzen, um unnötige Schäden und beschleunigten Abbau zu vermeiden. Dies bezieht sich nicht nur auf die Erhöhung der Gleichgewichtsfeuchte, sondern auch auf ihre Verringerung durch Trocknung, die eine bestimmte Gleichgewichtsfeuchte unterschreiten. Weil jedoch so gut wie keine Daten zur Gleichgewichtsfeuchte an degradierten Leinwänden existieren, basiert der Einsatz von Feuchte auf rein empirischen Erfahrungen.

In Bezug auf die Dimensionsänderungen degradierter Leinwände, lässt die Auswertung der genannten Studien annehmen, dass sich nicht die Art des Dimensionsverhaltens durch die Degradation verändert, sondern eher das Ausmaß der Bewegung. Ob sich das Gewebe bei wechselnden Umgebungsfeuchten ausdehnt oder schrumpft, scheint ebenso wie bei einem neuen Gewebe auch, von der Gewebegeometrie und der auf die Fäden wirkenden Kraft beeinflusst zu werden. Dies ist jedoch experimentell noch nich zweifelsfrei belegt worden. Vor allem hinsichtlich der Gewebegeometrie wurden bisher nur oberflächliche Rückschlüsse gezogen. Genau wie auch bei der nicht degradierten Leinwand, scheint die Nassquellung andere Reaktionen hervorzurufen, als die Trockenquellung.

Offensichtlich treten am Bildträger des Leinwandgemäldes sowohl Vergrößerung als auch Schrumpfung aufgrund von wechselnden Umgebungsfeuchten auf. Eine verlässliche Vorhersage, wann dies der Fall ist und wovon die jeweiligen Bewegungen abhängen, kann derzeit nicht getätigt werden. Dem Gegenüber steht jedoch die konservatorische und restauratorische Praxis, die sich diese Effekte durchaus zu Nutze macht, indem der Einsatz einer erhöhten Umgebungsfeuchte die Ausdehnung der Leinwand bewirken soll und überdehnte Bereiche durch den Eintrag von flüssigem Wasser wieder geschrumpft werden sollen.[545]

545 Heiber 2006, S. 48.

Wie sich der textile Bildträger im Kontext eines gealterten Gemäldes verhält, wurde bisher fast ausschließlich an Materialien untersucht, die dem Gemäldeaufbau des 19. und 20. Jhs. entsprechen. Der Großteil dieser Studien beobachtete zwar ein einheitliches Verhaltensmuster, jedoch kann dieses kaum verallgemeinert werden, da es sich auf eine relativ spezielle Gruppe von Gemälden hinsichtlich ihres maltechnischen Aufbaus handelt. Diese vereinfachte Sicht auf das Leinwandgemälde hat es ermöglicht, wichtige Erkenntnisse zu erhalten. Weitere Forschungen sollten jedoch nicht auf diesem vereinfachten Modell aufbauen, sondern dieses mit mehr Daten unterbauen und erweitern. Dies bezieht sich vor allem auf eine Ausweitung der Untersuchungen auf andere maltechnischen Zusammensetzungen der Gemälde.

4 Forschungsfragen und Zielstellung des experimentellen Teils

4.1 Analyse von Kapitel 3: Zusammenfassung einflussgebender Faktoren auf das hygrische Verhalten der Leinwand

Wie viele und wie schnell Wassermoleküle von der Leinwand aufgenommen und wieder abgegeben werden, beruht in Teilen auf den Umgebungsbedingungen, in hohem Maße jedoch auf ihrem vielschichtigen Aufbau. Wassermoleküle dringen durch die Zwischenräume von Gewebe, Garn und technischer Faser in die Zellwand der Elementarfaser ein und werden dort zwischen den Celluloseketten mehr oder weniger fest gebunden. Ab einer gewissen Menge ist dies mit Volumensänderungen verbunden.
Alle Faktoren, die den Aufbau der Leinwand verändern, beeinflussen folglich auch ihre Sorptions- und Desorptionseigenschaften. Diese sind in den folgenden Punkten zusammengefasst.

1. Wechselwirkungen mit Wasserdampf oder flüssigem Wasser.

   Die Bindung von Wassermolekülen steht in direkter Konkurrenz zur supramolekularen Struktur der Cellulose, die zum Großteil auf Wasserstoffbrückenbindungen beruht. Sorption und Desorption bedeuten immer eine Veränderung der supramolekularen und morphologischen Struktur der Cellulose. Es kommt zu Neuordnungen der Makromoleküle zueinander, die nicht immer reversibel sind. Bemerkbar machen kann sich dies in einer Veränderung sowohl der Kristallinität als auch der Zwischen- und Hohlräume auf allen Ebenen von der Cellulose bis zum Gewebe. Man geht davon aus, dass zyklisches Quellen und Schwinden die Sorptionsfähigkeit herabsetzt.
   Wässrige Behandlungen und Trocknungen sind mit der Entstehung der Leinwand eng verbunden. Sie sind in nahezu allen Schritten der Verarbeitung vorhanden: Während der Fasergewinnung, vor allem bei der Röste, beim Verspinnen der technischen Fasern zum Garn und während der Webvorgänge. Ein Großteil der Veredlungsbehandlungen

von Garn und Gewebe werden als wässrige Verfahren vorgenommen, so z. B. das Bleichen. Auch die maltechnische Vorbereitung des Bildträgers beinhalten wässrige Maßnahmen, wie das Dekatieren und das Auftragen einer wässrig gebundenen Vorleimung. Darüber hinaus gehören alle Schwankungen der Umgebungsfeuchte im Laufe der Zeit des Leinwandgemäldes zu diesen Einfluss nehmenden Wechselwirkungen mit Wassermolekülen. Die Erhöhung der Umgebungsfeuchte beschleunigt die Degradation der Leinwand, insbesondere die zyklisch schwankende Umgebungsfeuchte (siehe auch Punkt 7).

2. Kontakte mit Chemikalien.

   Kommt das Fasermaterial mit stark quellenden Chemikalien in Kontakt, kommt es in der Regel zu Veränderungen des supramolekularen und morphologischen Aufbaus der Cellulose. Während des textiltechnischen Verarbeitungsprozesses nehmen Alkalien diese Rolle ein. Sie kommen bei der Fasergewinnung, bei Veredlungsprozesen, wie dem Bleichen und beim Entschlichten der Garne oder Gewebe zum Einsatz.

3. Zusammensetzung der Leinwand.

   Die technischen Fasern, die der Leinwand zugrunde liegen, setzen sich neben Cellulose aus verschiedenen Begleitsubstanzen zusammen. Darüber hinaus setzt sich ein Garn produktionsbedingt aus unterschiedlichen Anteilen an Langfasern, Werg und Schäben zusammen. Beeinflusst werden diese unterschiedlichen Zusammensetzungen durch die Fasergewinnung, vor allem den Faseraufschluss während der Röste, der mechanischen Faserbearbeitungsschritte, dem Schwingen und Hecheln und durch die Degradation. Während der Degradation werden die einzelnen Bestandteile unterschiedlich abgebaut, wodurch sich ihre Art oder ihre Anteile zueinander verändern können.

4. Garn- und Gewebegeometrie.

   Durch die unterschiedlichen Arten des Spinnens und Webens können sehr unterschiedliche Geometrien sowohl im Garn als auch im Gewebe entstehen. Als Resultat ergeben sich Unterschiede z. B. in der Feinheit und der Dichte, die sowohl die Menge der aufgenommenen Feuchte beeinflussen, als auch die daraus resultierenden Dimensionsänderungen der Leinwand. Veränderungen der Garn- und Gewebegeometrie können auch durch wiederholtes Quellen und Schwinden im aufgespannten Zustand entstehen.

5. Ein- und Aufbringen anderer Materialien.

   Die während des textiltechnischen Verarbeitungsprozesses eingebrachten Materialien sind im Garn die Schlichte und bezogen auf das Gewebe diverse Ausrüstungen im Sinne einer Veredlung. Art und Menge der noch in der Leinwand vorhandenen Bindemittel wirken sich auf die Aufnahme von Feuchte aus.

In ihrer Funktion als Bildträger eines Leinwandgemäldes können auf der Leinwand in unterschiedlicher Anzahl und Schichtdicke Vorleimung, Grundierung, Malschicht und Firnis aufliegen. Sind diese in Teilen in die Leinwand eingedrungen, beeinflussen sie die Aufnahme von Feuchte, darüber hinaus beeinflussen sie jedoch die Bewegungsfreiheit der Leinwand und verändern so die Dimensionsänderungen, die durch das Quellen und Schwinden hervor gerufen werden.
Auch durch Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen können unterschiedliche Materialien in die Leinwand eingebracht worden sein, die das hygrische Verhalten verändern können.

6. Auf die Leinwand wirkende Kräfte.

Während der textiltechnischen Verarbeitung der Fasern, im Wesentlichen während des Spinnens, Webens und bei den abschließenden Veredlungsverfahren werden in das Material verschiedene Spannungen eingebracht, die bei einer anschließenden Wechselwirkung mit Wassermolekülen das Verhalten beeinflussen (so z. B. der Relaxationsschrumpf).
Die Dimensionsänderungen der Leinwand werden durch die auf die einzelnen Fäden wirkende Kräfte beeinflusst. Je nach Aufspannungsart können sie unterschiedlich ausfallen.

7. Degradation.

Die Degradation der Leinwand wird ausgelöst und beeinflusst durch Lichteinstrahlung, Temperatur und Umgebungsfeuchte. Die dadurch ablaufende Oxidation und Hydrolyse führen in der Cellulose zur Abnahme ihrer Kettenlänge und zum Anstieg der Kristallinität. Man geht davon aus, dass die Sorptionsfähigkeit abnimmt. Die Menge und Form der Zwischenräume auf allen strukturellen Ebenen sind ebenfalls Veränderungen unterworfen.

Die genannten Faktoren verändern also den Aufbau der Leinwand und des Leinwandgemäldes auf allen strukturellen Ebenen. Dadurch verändert sich sowohl die Menge an Feuchte, die das Material binden kann, als auch die Art und das Ausmaß der daraus resultierenden Dimensionsänderung.
Es kann fest gestellt werden, dass der Kenntnisstand insgesamt mit der Zunahme an Komplexität des Aufbaus immer weiter abnimmt. Es kann eine Gewichtung im Wissenstand zugunsten des Aufbaus der Cellulose verzeichnet werden. Das liegt zum einen daran, dass sich diese Kenntnisse aus verschiedenen Disziplinen zusammensetzen, wie der Cellulose-, Papier- und Textilforschung. Demgegenüber ist die Forschung in der Konservierungswissenschaft noch relativ jung, was sicher auch dazu beiträgt, dass Ergebnisse zum vollständigen Aufbau des Leinwandgemäldes mehr Fragen offen lassen und bisher nur in Bezug auf eine kleine Auswahl

an Materialien vorliegen. Gleichzeitig ist nicht immer belegt, ob sich die Erkenntnisse über das Verhalten der Cellulose direkt auf das Verhalten einer Leinwand übertragen lassen.

Es sollte jedoch das Ziel sein, den Kenntnisstand zu erweitern, um die Anwendung von Feuchte am Leinwandgemälde so gezielt wie möglich einsetzen zu können und um die Verhaltensweisen besser vorhersehen zu können.

4.2 Forschungsfragen

Weil das hygrische Verhalten der Leinwand in erster Linie von ihrem Aufbau bestimmt wird, ergibt sich ein Großteil der Forschungsfragen aus den Lücken im Wissen um diesen Aufbau. Darüber hinaus ist nicht klar, wie sich die einzelnen Faktoren gegenseitig beeinflussen und welchen Stellenwert sie einnehmen. Ein Vorhersagen des hygrischen Verhaltens der Leinwand und des Leinwandgemäldes ist bisher nicht möglich. Der Vorschlag sowohl von Hedley[546] also auch von Berger[547], ein Stück Gewebe vom Spannrand zu entnehmen, um die Art und das Ausmaß der Reaktion während des Befeuchtens zu testen, kann kaum als allgemeine Empfehlung gelten. Neben der Frage der Unversehrtheit des Kunstwerkes ist nach dem derzeitigen Kenntnisstand nicht davon auszugehen, dass sich der Spannrand identisch zu Gewebeteilen der Bildfläche verhält (es gelten Punkte 5, 6 und 7 des vorhergehenden Abschnittes).

Um ein grundlegendes Verständnis des hygrischen Verhaltens und der damit verbundenen Reaktion der Leinwand zu erlangen, ist eine intensive Auseinandersetzung mit ihrem Aufbau nötig. Bisher sind diese Kenntnisse sehr lückenhaft. Insgesamt können folgende Forschungsfragen aus dem bisher gesagten abgeleitet werden:

- Der Zustand der Cellulose in der Leinwand kann durch ihren durchschnittlichen Polymerisationsgrad (DP) charakterisiert werden, wozu auch Vergleichswerte vorliegen. Im Gegensatz dazu haben sich sowohl für die Beschreibung der Verhältnisse zwischen amorphen und kristallinen Bereichen, als auch für die Charakterisierung der Hohlräume auf den verschiedenen Ebenen der Leinwand bisher keine geeigneten Methoden etabliert. Demzufolge liegen kaum Vergleichswerte für die Kristallinität und gar keine Kenntnisse über Hohlräume in der Leinwand vor. Es besteht der Bedarf, methodische Vorgehen zu entwickeln, um die Kristallinität und die Menge und Größe der Hohlräume zu erfassen.

546 Hedley 1993, S. 114.
547 Berger 2000, S. 67.

- Allen drei zuvor genannten Parametern (DP, Kristallinität, Hohlräume) wird ein Einfluss auf das hygrische Verhalten von auf Cellulose basierenden Materialien zugesprochen. Diese Erkenntnisse wurden in der Regel an Papier oder reiner, pulverisierter Cellulose gewonnen. Ein experimenteller Nachweis dieser Zusammenhänge an der Leinwand ist bisher nicht erfolgt. Dies sollte jedoch in Hinblick auf die Alterung der Leinwand unbedingt erfolgen, da sich alle drei Eigenschaften während der Alterung maßgeblich ändern.

- Welche Unterschiede ergeben sich durch historische und moderne Verfahren der Leinwandherstellung und in welchem Maß wird das hygrische Verhalten davon beeinflusst? Dies bezieht sich vor allem auf den Faseraufschluss durch die Röste, das manuelle und maschinelle Spinnen und Weben, die Nachbehandlung der Gewebe im Sinne der Appretur und des Bleichens.

- Welche Unterschiede bestehen in der Zusammensetzung der Leinwände hinsichtlich der neben Cellulose vorkommenden Begleitsubstanzen, sowie der Anteile an Langfasern, Werg und Schäben. Können Unterschiede zwischen historischen und modernen Herstellungsverfahren in Bezug auf die Zusammensetzung festgestellt werden? Inwieweit beeinflussen Unterschiede in der Zusammensetzung das hygrische Verhalten der Leinwand?

- In Bezug auf die Gleichgewichtsfeuchte von Leinwänden können folgende Fragen formuliert werden:
  Wie groß sind die Unterschiede der Gleichgewichtsfeuchte zwischen technischer Faser, Garn und Gewebe?
  Wie hoch ist die Gleichgewichtsfeuchte von degradierten Leinwänden? Welche Merkmale der Leinwand können in diesem Zusammenhang beschrieben werden?
  Wie schnell ist die Gleichgewichtsfeuchte an neuen und historischen Leinwänden erreicht?
  Verändert sich die Gleichgewichtsfeuchte einer Leinwand im aufgespannten Zustand?

- In Bezug auf die Dimensionsänderungen von Leinwänden aufgrund wechselnder Gleichgewichtsfeuchte stellen sich folgende Fragen:
  Wie groß sind Dimensionsänderungen an der technischen Faser, am Garn und Gewebe? Wie können diese jeweils erfasst werden?
  Wie schnell äußern sich wechselnde Gleichgewichtsfeuchten in Dimensionsänderungen der technische Faser, Garn und Gewebe?
  Welchen Einfluss hat die Garn- und Gewebegeometrie auf die Dimensionsänderungen der Leinwand?
  Verändern sich die Dimensionsänderungen aufgrund der Degradation der Leinwand?

Ab wann ist die Gleichgewichtsfeuchte so hoch, dass sich dadurch die Reaktionen der Leinwand verändern?

- Um bestimmte Fragen beantworten zu können, sind für das experimentelle Vorgehen folgende Herausforderungen zu lösen:
  Wie kann die Gleichgewichtsfeuchte in situ an der Leinwand erfasst werden?
  Wie kann experimentell unterschieden werden zwischen dem Vorhandensein von Wasserdampf und flüssigem Wasser in der Leinwand?
  Wie kann die auf die Leinwand wirkende Kraft oder die daraus resultierende Spannung erfasst werden?

- In Bezug auf die Alterung von Leinwänden sind bisher folgende Fragen offen:
  Wie beeinflusst die auf die Leinwand wirkende Kraft (durch die Aufspannung) ihre Degradation?
  Wie verändert sich die Dehnbarkeit degradierter Leinwände bei unterschiedlichen Gleichgewichtsfeuchten?

In Bezug auf das hygrische Verhalten des Leinwandgemäldes werden die offenen Forschungsfragen an dieser Stelle nicht detailliert formuliert, weil zunächst das Verhalten der Leinwand im Fokus dieser Arbeit steht. Zusammenfassend kann jedoch festgestellt werden, dass dringender Forschungsbedarf besteht, eine größere Vielfalt an Zusammensetzungen des Leinwandgemäldes in Bezug auf Vorleimung, Grundierung und Malschicht im Zusammenhang mit dem hygrischen Verhalten zu untersuchen.

Anand der formulierten Fragen wird deutlich, dass der Konservierungswissenschaft ein großes Feld an Untersuchungsmöglichkeiten offen steht, für das häufig weder methodische Vorgehensweisen, noch das grundlegende Verständnis des Materialverhaltens vorhanden sind.

Eine Herausforderung ist die Erarbeitung von methodischen Vorgehen und Messverfahren, vor allem in Hinblick auf ihre Anwendbarkeit auf historische Proben. Fasern, Garne und Gewebe sind keine regelmäßigen Strukturen, die einfach in mathematischen Formeln beschrieben werden können. Daher ist man auf statistische Untersuchungen angewiesen, mit all ihren Einschränkungen in Form von Fehlern, Variationen und Unsicherheiten.[548]

Durch den großen Einfluss des Aufbaus der Leinwand auf allen strukturellen Ebenen und in Anbetracht der Wissenslücken, die auf diesem Gebiet bestehen, ist es wenig angemessen, aus den bisher publizierten, wenigen aber wichtigen Untersuchungen, so weitreichende Schlüsse und Interpretationen zu ziehen, die das prinzipielle Verhalten des Leinwandgemäldes darstellen sollen. Auf dem Gebiet der Einflussfaktoren bestehen derzeit noch große Wissenslücken, dass diese zunächst geschlossen werden sollten, um nicht auf dem lückenhaften Wissenstand weiter

548 Peirce 1937, S. T45.

aufzubauen. Auch Michalski resümiert über sein Modell zum Verhalten des Leinwandgemäldes, dass es auf einer unzureichenden Datenlage basiert.[549] Es ist aus derzeitiger Sicht daher notwendig, mehr grundlegende Daten sowohl zum Aufbau der zu untersuchenden Materialien, als auch zu deren Wechselwirkungen mit Feuchte, u. a. der Gleichgewichtsfeuchte zu erfassen, um die Zusammenhänge besser verstehen zu können. Darüber hinaus gilt es Messverfahren zu entwickeln bzw. zu verifizieren. In diesem Sinne sind bereits verschiedene Ansätze publiziert worden. Der Ansatz von Bilson, das Ausmaß der Dimensionsänderungen an Geweben optisch zu erfassen und auszuwerten scheint vielversprechend und könnte in einer systematischen Studie wertvolle Daten liefern.[550] Auch Haller und Odlyha haben wertvolle Ansätze publiziert, Daten über das hygrische Verhalten der Bildträger zu erfassen.[551]

4.3 Ziele des experimentellen Teils

Für die Beantwortung der formulierten Forschungsfragen stehen bisher nicht für alle Fragen die methodische Vorgehensweise und geeignete Messverfahren zur Verfügung. Diese müssen für einzelne Aspekte zunächst entwickelt und hergeleitet werden. Unter diesen Voraussetzungen sollte der experimentelle Teil der vorliegenden Arbeit vor allem ein methodisches Vorgehen für bestimmte Fragestellungen erarbeiten und die dafür relevanten Messverfahren entwickeln bzw. überprüfen.

Die leitende Fragestellung war dabei, ob ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Cellulose auf molekularer und supramolekularer Ebene, und der Gleichgewichtsfeuchte an unterschiedlich degradierten Leinwänden nachgewiesen werden kann.

Die Merkmale, die zur Identifizierung des Zustandes der molekularen und supramolekularen Ebene der Cellulose bestimmt werden sollten waren der pH-Wert, die Kettenlänge und die Kristallinität der Cellulose. Für eine Einschätzung der erfolgten Degradation sollte zusätzlich die Festigkeit bestimmt werden. Darüber hinaus sollten die jeweiligen Gewebe möglichst umfassend dokumentiert werden, was in Form einer Gewebestrukturanalyse erfolgte.
Zunächst bestand die Herausforderung, Messverfahren zu wählen und teilweise auch zu entwickeln, um die genannten Merkmale sowohl an neuem Material als auch an historischen Proben zu erfassen. Die Schwierigkeit in der Bewertung der Degradation liegt darin, dass es für Flachs-

549 Michalski 2013, S. 349.
550 Bilson 1996.
551 Haller 2007; Odlyha et al. 1996.

gewebe keine publizierte Daten gibt, die einen Bezug zwischen pH-Wert, Kettenlänge und Kristallinität der Cellulose und der Festigkeit herstellen.[552]

Zentraler Baustein des experimentellen Teils stellt die Erfassung der Gleichgewichtsfeuchte der unterschiedlich degradierten Leinwandproben dar. Wie groß sind die Unterschiede zwischen den unterschiedlich degradierten Leinwänden? Kann man die Gleichgewichtsfeuchte mit den gemessenen Merkmalen der Degradation in Zusammenhang bringen? Vor allem sollten hier die Kettenlänge und Kristallinität der Cellulose beleuchtet werden.

Um in der Konservierungswissenschaft über ein Instrument zu verfügen, die Gleichgewichtsfeuchte auch in situ an der Leinwand erfassen zu können, sollte ein geeignetes Messinstrument überprüft werden, welches auf der Nahinfrarot-Spektroskopie beruht. Eine solche direkte Messmethode würde die Untersuchungsmöglichkeiten für die Frage des hygrischen Verhaltens um einen entscheidenden Schritt erweitern.

552 Young 2005.

5 Analyse und Bewertung relevanter Messverfahren

Für die in Kapitel 4 genannten Fragestellungen und Ziele des experimentellen Teils gilt es, geeignete Vorgehensweisen und Messverfahren zu wählen. Für einige dieser Fragestellungen liegen bisher keine standardisierten Abläufe vor, vor allem in Hinblick auf ihre Anwendbarkeit auf Proben historischer Bildträger. Aus diesem Grund werden im folgenden Kapitel in unterschiedlicher Ausführlichkeit geeignete Verfahren diskutiert. Daraus werden entsprechende Messverfahren für die Durchführung, die in Kapitel 6 beschrieben wird, abgeleitet. Der letzte Abschnitt dieses Kapitels, „Weiterführende Methoden„, stellt Vorgehensweisen vor, die nicht im experimentellen Teil dieser Arbeit angewandt wurden. Sie dienen dem Ausblick auf zukünftig mögliche, weiterführende Untersuchungen.

5.1 Auswahl der Versuchsgewebe und deren Charakterisierung

5.1.1 Die Wahl der Versuchsgewebe

Bei der Auswahl sowohl der neuen als auch historischen Gewebe für die in dieser Arbeit durchgeführten Experimente sollten Gewebe gewählt werden, welche den durchschnittlichen Bildträger eines Leinwandgemäldes möglichst gut repräsentieren.
Bezüglich der Faserart wurden die Versuche auf eine Faserart beschränkt, weil der Fokus der Untersuchung auf dem hygrischen Verhalten in Abhängigkeit der Alterung des Materials liegt, und nicht auf dem Vergleich verschiedener Faserarten. Es sollte eine Faserart gewählt werden, von der man ausgehen kann, dass sie als Bildträger über einen großen Zeitraum zur Anwendung kam. Im allgemeinen kunsttechnologischen Verständnis wird Flachs als überwiegendes Ausgangsmaterial für textile Bildträger angesehen, weil Flachs zeitlich wie geografisch in Europa bis in die zweite Hälfte des 19. Jhs. angebaut wurde und weit verbreitet war. Die kunsttechnologische Forschung hat auf diesem Gebiet jedoch noch großen Bedarf. Die Durchführung von Faseranalysen an originalen Bildträgern ist leider noch kein standardisiertes Vorgehen im Rahmen der Untersuchung und Dokumentation eines Leinwandgemäldes. Die wenigen systematischen Studien zu verwendeten Faserstoffen textiler Bildträger, die eine Faseranalyse

einschließen, lassen jedoch erahnen, dass es nicht Flachs allein ist, woraus die Bildträger der Gemälde entstanden sind.[553] Dennoch kann man sicher davon ausgehen, dass Flachs vom Mittelalter bis ins 20. Jh. einen hohen Stellenwert als Rohstoff für textile Bildträger zukommt. Für die hier konzipierten Versuche standen ausreichend originale Gemälde unterschiedlicher Entstehungszeiten mit Flachsgeweben als Bildträger zur Verfügung.
Als Bindungsart wurde die im kunsttechnologischen Kontext häufig anzutreffende Leinwandbindung gewählt.

Neue Gewebe

Der Anspruch bei der Auswahl eines neuen Gewebes für die Durchführung der Experimente war eine möglichst genaue Charakterisierung hinsichtlich der Gesamtheit seiner Produktion. Ein Höchstmaß an Transparenz erhöht die Möglichkeiten der Vergleichbarkeit zu anderen Betrachtungen auf diesem Gebiet. Außerdem sollten die Verarbeitungsschritte so weit wie möglich jenen historischer Gewebe gleichen. Dadurch sollte eine Vergleichbarkeit der Gewebe gewährleistet sein. Diese Randbedingungen beschränkten die Wahl der Bezugsquellen deutlich. Es ist selten möglich, die vollständige Produktionskette des jeweiligen Gewebes nachzuvollziehen. Die meisten Faserrohstoffe oder auch Garne werden aus dem Ausland importiert, wodurch in der Regel keine Informationen zu Anbau, Ernte und Verarbeitung vorliegen.
Es wurde ein Flachsgewebe einer Leinenweberei in Schleswig-Holstein gewählt. Aufgrund ihres eigenen Anbaus der Flachspflanzen war es möglich, von der Weberei Auskunft über die meisten Verarbeitungsschritte von der Ernte der Flachspflanze bis zur Herstellung des Gewebes zu erhalten.

Historische Gewebeproben

Für die hier vorgestellte Untersuchung wurden Gemälde ausgewählt, die an der HfBK Dresden, im Studiengang Restaurierung, untersucht bzw. restauratorisch bearbeitet wurden. Die Gemälde sollten so gewählt sein, dass eine ausreichende Probenentnahme am Bildträger vertretbar war. Die Auswahl erfolgte zunächst aufgrund der Faserart Flachs und der Leinwandbindung. Sie sollten keine gravierenden restauratorischen Eingriffe hinter sich haben, die den Ablauf der Alterung sowie die Eigenschaften des Bildträgers beeinflussen könnten. Darüber hinaus wurden die Gemälde so gewählt, dass eine gewisse zeitliche Spannweite ihrer Entstehung abgedeckt wurde.

553 Vanderlip de Carbonnel 1980 und Wufka 2004.

5.1.2 Künstliche Alterung neuer Gewebe

Eine künstliche Alterung soll die altersbedingten Veränderungen eines Materials unter natürlichen Bedingungen simulieren. Dabei sollen in einem wesentlich kürzeren Zeitraum identische Reaktionen ablaufen. Weil jedoch die äußeren und inneren Voraussetzungen für den Ablauf der Degradation von textilen Bildträgern sehr individuell sind, ist die Festlegung der Parameter für die künstliche Alterung nicht eindeutig.
Die Degradation eines Flachsgewebes ist neben den Materialeigenschaften selbst, von zahlreichen äußeren Einflüssen abhängig, die im Material chemische und physikalische Veränderungen verursachen.[554] Ausschlaggebende Faktoren sind dabei im Wesentlichen Licht, Temperatur und Luftfeuchte, die in unterschiedlichen Kombinationen und Intensitäten für die künstliche Alterung von Flachsgeweben Anwendung finden. Diese einzelnen Faktoren können nicht isoliert betrachtet werden, weil sie sich im komplexen Zusammenspiel der Alterungsmechanismen gegenseitig beeinflussen. Unter natürlichen Alterungsbedingungen können die äußeren Einflüsse sehr unterschiedlich sein, je nach Aufbewahrungsbedingungen der Leinwandgemälde.
Aufgrund der Komplexität der Zusammenhänge und der individuellen Zielstellung bei der Durchführung einer künstlichen Alterung gibt es für Flachsgewebe oder auch allgemeiner für cellulose basierte Gewebe in der Konservierungswissenschaft keinen Konsens über die Art, Intensität und Dauer der einzelnen Parameter. In der Konservierungswissenschaft existiert eine Vielzahl von publizierten Untersuchungen und Beispielen zum Thema der künstlichen Alterung. Einen allgemeinen Überblick und Stand der Forschung im Bereich der Papierkonservierung bieten Porck[555] sowie Zervos et al.[556] Eine vergleichbare Zusammenstellung in Bezug auf den textilen Bildträger liegt bisher nicht vor. Es existiert ein genormtes Verfahren im Rahmen der Textilprüfung. Darin wird die künstliche Alterung von Textilien bei 70 °C festgelegt. Die relative Luftfeuchte (rF) von 50 % wird für solche Materialien empfohlen, bei welchen ein Einfluss der Feuchtigkeit zu erwarten ist.[557]
Im Folgenden werden anhand der Parameter Licht, Temperatur, Luftfeuchtigkeit und Chemikalien die äußeren Rahmenbedingungen der künstlichen Alterung diskutiert. Viele Erkenntnisse zur Degradation von Cellulose beziehen sich auf das Ausgangsmaterial Papier, weshalb auch in Bezug auf die künstliche Alterung ein Großteil der Ergebnisse aus diesem Bereich stammt.
Der Einfluss von Spannungen auf die Alterung eines Flachsgewebes, wurde bereits erörtert.[558] In der Durchführung der Experimente sollte der Einfluss der Aufspannung berücksichtig werden.

554 Siehe Kapitel 3.7.2 „Auslösende Faktoren„ S. 130.
555 Porck 2000.
556 Zervos/Moropoulou 2006.
557 NORM DIN 53896.
558 Siehe Kapitel 3.7.2: „Physikalische/Mechanische Einflüsse„ S. 134

In der Konservierungswissenschaft wird die Frage, ob es möglich ist, die künstliche Alterung in Bezug zu einem konkreten Zeitraum unter natürlichen Bedingungen zu setzen, kontrovers diskutiert. Es existieren z. B. verschiedene Modelle welchem Zeitraum der natürlichen Alterung eine Erhöhung der Temperatur entspricht. Die Dauer der Alterung bei einer bestimmten Temperatur in zeitlichen Bezug zur natürlichen Alterung zu setzen ist jedoch nicht zweifelsfrei möglich. Erhardt/Mecklenburg beschäftigten sich mit der Kinetik der Cellulosealterung und kommen zu dem Schluss, dass die Faustregel, dass während einer Wärmealterung pro 10 °C die Reaktionsgeschwindigkeit verdoppelt wird, nicht korrekt ist. Grund ist, dass die Reaktionsgeschwindigkeit nicht nur von der Temperatur, sondern auch von der Aktivierungsenergie abhängt. Die Aktivierungsenergie ist für jede Reaktion spezifisch. Sie gibt an, wie sensibel die Reaktion auf eine Temperatur reagiert. Je höher die Aktivierungsenergie, desto sensibler reagiert die Reaktion. Relativ gesehen wird die Reaktion dann also stärker beschleunigt bei steigender Temperatur. Die meisten Degradationsmechanismen von Cellulose haben eine Aktivierungsenergie von 20–30 kcal. Dadurch ergibt sich eine Verdopplung der Reaktionsgeschwindigkeit ca. alle 5 °C.[559]

Bobeth bezieht die zeitliche Korrelation von künstlicher Wärmealterung von Textilien bei 70 °C zur natürlichen Alterung aus einer schweizer Norm. Demnach entspricht die künstliche Alterung für einen Tag einer natürlichen Alterung von 1—2 Monaten.[560] Allerdings bezieht sich diese Angabe auf Textilien allgemein und nicht speziell auf den Ausgangsstoff Cellulose.

Tabelle 5.1 zeigt anhand einer beispielhaften Berechnung die Gegenüberstellung der von Erhardt/Mecklenburg und Bobeth vorgeschlagenen Berechnung der Intensität der künstlichen Alterung. Sie können als Orientierung dienen, allerdings handelt es sich in beiden Fällen um eine Wärmealterung bei Abwesenheit von Licht und Luftfeuchtigkeit. Beide Faktoren verändern jedoch die Art der Alterung, wie im weiteren Verlauf beschrieben wird und beeinflusst damit auch den Grad der Degradation. Der Vergleich soll verdeutlichen, wie stark die Annahmen, welchem Zeitraum unter natürlichen Bedingungen eine bestimmte künstliche Alterung entspricht, voneinander abweichen. Es existieren keine allgemeingültigen Modelle zur Berechnung des komplexen Zusammenspiels aller oben genannten äußeren Einflussfaktoren, geschweige denn individuell angepasst für definierte Materialien, die gealtert werden sollen. Aus diesem Grund lehnt Bansa solche Bezüge prinzipiell ab und hält lediglich relative Aussagen der Materialien zueinander für sinnvoll.[561] Auch bei der in dieser Arbeit durchgeführten künstlichen Alterung wird auf einen Bezug zu einer Alterung unter natürlichen Bedingungen verzichtet.

559 Erhardt/Mecklenburg 1995.
560 Bobeth 1993, S. 325.
561 Bansa 2002.

Tabelle 5.1: Dauer der künstlichen Alterung durch erhöhte Temperatur in Bezug zur natürlichen Alterung nach unterschiedlichen Autoren.

Künstliche Alterung bei 70 °C in Tagen (Wochen)	Natürliche Alterung in Monaten nach Bobeth 1993	Natürliche Alterung in Monaten nach Erhardt/Mecklenburg 1995
28 (4)	28—56	20
70 (10)	70—140	50

Chemikalien

Die Alterung von Geweben durch den Einsatz von Chemikalien ist vereinzelt in der Konservierungswissenschaft durchgeführt worden.
Von Young/Hibberd und Carr et al. wurden Gewebe in 10%iger Schwefelsäure gealtert mit dem Ziel, eine durch die Säure katalyiserte Hydrolyse zu provozieren.[562] Im Rahmen von verschiedenen Seminararbeiten entwickelte sich unter der Leitung von Heiber an der HfBK Dresden das Altern von Geweben in einer Kaliumpermanganat-Lösung. Dabei sollte die Oxidation der Cellulose beschleunigt werden.[563] Beide Vorgehensweisen hatten zum Ziel, vor allem einen bestimmten chemischen Abbaumechanismus zu beschleunigen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit stand im Vordergrund, alle verschiedenen chemischen Veränderungen im Gewebe zu beschleunigen, die auch in der natürlichen Alterung ablaufen. Die Alterung durch Chemikalien wurde daher nicht in Betracht gezogen.

Licht

Licht soll zu Beginn der künstlichen Alterung auf das Gewebe einwirken, um beim Vorhandensein von Sauerstoff die Bildung von Carbonyl- und Carboxylgruppen zu ermöglichen. Diese sollen dann im weiteren Verlauf durch Hydrolyse die Depolymerisation der Cellulose ermöglichen. Außerdem ist es möglich, dass durch die vorherige Bestrahlung mit Licht die anschließende Abbaurate während einer Alterung durch erhöhte Temperatur, erhöht wird. Dies wurde an Papier nachgewiesen, welches bei 90 °C und 50 %rF gealtert wurde.[564]
Um die natürliche Alterung eines Kunstwerkes im Innenraum zu simulieren, wird bei der Bestrahlung der Wellenlängenbereich des Tageslichtes eingehalten. Die kurzwelligen UV-Anteile des Tageslichtes werden ausgeschlossen, da sie durch normales Fensterglas gefiltert werden. Das betrifft den Bereich der Strahlung unterhalb 325 nm.[565]
Die standardisierte Bestrahlung von Textilien mit Licht zur Farbechtheitsprüfung sieht eine Xenonbogenlampe vor.[566] Die dafür entwickelten Geräte haben sich auch für die künstliche Al-

562 Young/Hibberd 1999a; Carr et al. 2003a; Carr et al. 2003b.
563 Tost 2005; Dick 2006; Neufert 2006.
564 Lee et al. 1989.
565 Thomson 1986, S. 5.
566 NORM DIN EN ISO 105-B02.

terung als geeignet erwiesen und werden in der Konservierungswissenschaft angewendet.[567] Die Verwendung verschiedener Filter ermöglicht die Definition der Wellenlängenbereiche. Für die hier durchgeführten Experimente stand ein Gerät für die Bestrahlung mit einer Xenonbogenlampe zur Verfügung. Zusätzlich sollte im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden, ob eine längere Belichtung der Gewebe durch natürliches Tageslicht hinter Fensterglas einen vergleichbaren Zustand erzeugen kann, wie eine kürzere Belichtung mit Hilfe der Xenonbogenlampe. Die Alterung von Flachsgeweben durch Tageslicht hinter Fensterglas wurde bereits von Hackney/Hedley untersucht. Das Lagern der Gewebeproben hinter Fensterglas auf einem Dach während der Sommermonate Juli bis Oktober reduzierte ihre Festigkeit und erhöhte den pH-Wert.[568] Würde die Bestrahlung mit natürlichem Tageslicht eine vergleichbare Wirkung zeigen, stünde eine kostengünstige Alternative ohne Einschränkung der Probengröße, wie es bei der Xenonbogenlampe in der Regel der Fall ist, zur Verfügung. Um die Strahlungsintensität vergleichen zu können, die auf die jeweiligen Gewebe eingewirkt haben, empfiehlt es sich blaue Lichtechtheitstypen aus Wolle mit zu belichten.[569]

Temperatur

Für Cellulose in Papier wurde bis zu einer Temperatur von 90 °C nachgewiesen, dass sich die Degradation beschleunigen lässt, ohne die Art der ablaufenden Reaktionen zu verändern.[570] Bansa ist jedoch der Meinung, dass sich die Mechanismen während der Degradation von Papier unter- und oberhalb 70 °C unterscheiden.[571] Die Forschung zur künstlichen Alterung von Papier zeigte, dass eine Alterung unterhalb von 60 °C kaum merkliche Zustandsänderungen hervorruft. Auf welchen Zeitraum sich diese Aussage bezieht blieb jedoch offen.[572] Die deutsche NORM DIN 53896 und die schweizer NORM SNV 98890 sehen für die beschleunigte Alterung von Textilien eine Temperatur von 70 °C vor.[573] Dies erscheint auch im Kontext der oben genannten Untersuchungen eine sinnvolle Temperatur für Flachsgewebe.

Luftfeuchte

Analog zur erhöhten Temperatur gilt auch für die Luftfeuchte, dass der Abbau umso schneller abläuft, je höher die Luftfeuchte ist. Im Falle von Cellulose verläuft diese Abhängigkeit jedoch nicht linear, da die Feuchteaufnahme von Cellulose nicht linear verläuft. Im Wesentlichen

567 z. B. Scicolone et al. 1996.
568 Hackney/Hedley 1984.
569 NORM DIN EN ISO 105-B02.
570 Erhardt/Mecklenburg 1995.
571 Bansa 2002, S. 109.
572 Bégin/Kaminska 2002.
573 NORM DIN 53896 und Bobeth 1993, S. 324.

kommt es zu einer vermehrt ablaufenden Hydrolyse, je mehr Wassermoleküle zur Verfügung stehen, was den Abbau der Cellulose beschleunigt.[574]

An Papier wurde nachgewiesen, dass eine zyklisch schwankende Feuchte (dynamische Alterung) den Degradationsgrad noch weiter steigern kann. Hierfür wurden verschiedene Erklärungsmodelle von Shahani et al. zusammengestellt. Die bis dahin vorherrschenden Erklärungen hatten alle physikalische Ursprünge. Durch die Beobachtung von Vergilbungen und die Absenkung des pH-Wertes von Papier, schlussfolgerten die Autoren, dass chemische Veränderungen ebenfalls eine Rolle spielen müssen, welche die Reaktivität der Cellulose durch eine erhöhte Zugänglichkeit steigern. Die Autoren vermuten, dass durch den ständigen Feuchtewechsel eine Hydratation von Protonen an sauren Molekülen erleichtert wird. Ihre Mobilität wird erhöht, wodurch die Wahrscheinlichkeit zu einer Reaktion an den Hydroxygruppen der Cellulose steigt.[575]

Kässberger kommt mit seinen Versuchen zur dynamischen Alterung von Papier ebenfalls zu der Erkenntnis, dass es im Wesentlichen die Schwankungen der relativen Feuchte sind, die zu einem beschleunigten Abbau von verschiedenen Papieren führen. Ihre Festigkeit nahm deutlich schneller ab als bei einer statischen Alterung. Die Analogie zur natürlichen Alterung beweist er auf der Basis von Fleckenbildungen im Papier.[576]

Weder Shahani et al. noch Kässberger gehen jedoch auf die Art der Reaktionen ein, die beim Abbau von Cellulose eine Rolle spielen. Diese hängen nach Erhardt et al. direkt mit der Luftfeuchte zusammen. Die Autoren wiesen nach, dass durch die Variation der relativen Feuchte während der künstlichen Alterung von Papier, eine veränderte Verteilung der Reaktionsprodukte auftritt. Bei gleichbleibende Feuchte und erhöhter Temperatur ergeben sich gleichbleibende Reaktionsprodukte. Nachgewiesen wurde dies für Temperaturen bis zu 90 °C. Die veränderten Reaktionen durch die Variation einer rF von 30 %—80 % entsprechen nach Interpretation der Autoren jedoch jenen Reaktionen, die auch während einer natürlichen Alterung ablaufen. Sollen natürliche Alterungsprozesse simuliert werden, ist dies nur mit den unter natürlichen Bedingungen identischen Werten für die Feuchtigkeit bei gleichzeitiger Erhöhung der Temperatur möglich. Diese Ergebnisse beziehen sich auf eine künstliche Alterung unter Lichtausschluss.[577]

Eine dynamische Alterung hat in der hier vorliegenden Fragestellung nicht nur die Absicht das Material stärker zu degradieren. Die Frage, wie das Flachsgewebe auf wiederholte Be- und Entfeuchtung reagiert und sein zukünftiges hygrisches Verhalten beeinflusst, ist hier maßgebend. Ein Vergleich dieser Auswirkung mit einer Alterung bei gleichbleibender relativen Feuchte wäre hier äußerst aufschlussreich, muss aber zugunsten anderer Fragestellungen außer Acht gelassen werden.

574 Siehe Kapitel 3.7.2 „Auslösende Faktoren: Feuchte“ S. 132.
575 Shahani et al. 1989.
576 Kässberger 1998.
577 Erhardt/Mecklenburg 1995.

Die dynamische Alterung hat sich vor allem für die künstliche Alterung von Papier entwickelt. Beispiele und Untersuchungen zu ihrer Anwendung an Flachsgeweben sind bisher nicht publiziert. Kässberger sieht einen Zyklus von 60 Minuten bei 90 %rF und 75 Minuten bei 30 %rF im Wechsel vor. Ein Flachsgewebe braucht für das Angleichen an eine neue Umgebungsfeuchte mehr Zeit als Papier. Insofern wäre zu diskutieren, ob die Zeiten für das Verbleiben in der jeweiligen Feuchte verlängert werden. Dabei gilt das Erreichen des Gleichgewichtszustandes nicht als Ziel, aber als Orientierung. Konkrete Daten über die Geschwindigkeit von Sorption und Desorption sind nicht publiziert.[578] Aus einer Grafik von Klemm et al. geht der Gleichgewichtszustand von Cellulose aus Papier bei 75 %rF und 20 °C hervor. Nach ca. 7 Stunden ist er nahezu erreicht.[579] Bobeth nimmt für Gewebe allgemein eine Angleichzeit von 24 bis 72 Stunden an.[580] Die Dauer der jeweiligen Feuchtestufen einer dynamischen Alterung von Flachsgeweben kann also zwischen diesen beiden Werten liegen und wurde im Falle der hier durchgeführten Experimente auf 12 h fest gelegt.

Aufspannung

Bei der künstlichen Alterung von Geweben wurde der Aspekt der Aufspannung bisher kaum berücksichtigt. Untersuchungen zum methodischen Vorgehen liegen nicht vor. Es liegen lediglich vereinzelte Ergebnisse über den Einfluss der Aufspannung auf die Alterung einer Leinwand vor.[581] Diese lassen erkennen, dass die Aufspannung während der Alterung durchaus Einfluss auf das anschließende Verhalten der Leinwand nimmt. Weil das Leinwandgemälde, welches Gegenstand der vorliegenden Untersuchung ist, aufgespannt ist, soll die Aufspannung in die künstliche Alterung mit aufgenommen werden.
Für eine möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung im Gewebe, erscheint die holländische Spannmethode geeignet.[582] Dafür wird ein Bindfaden durch den Rand des Gewebes genäht und um einen Rahmen geführt. Die Schnur ist für das gesamte Gewebestück durchläufig. Ein weiterer Vorteil dieser Methode für die hier konzipierten Versuche ist die Möglichkeit, während der klimatischen Alterung auf einfache Weise das Gewebe gleichmäßig Nachspannen zu können.

Zusammenfassung

Aus den oben diskutierten Rahmenbedingungen der künstlichen Alterung wurde folgendes Programm für die künstliche Alterung gewählt.[583]

---

578 Siehe Kapitel 3.5.4 „Geschwindigkeit von Sorption und Desorption“ S. 86.
579 Klemm et al. 1998, S. 47.
580 Bobeth 1993, S. 235.
581 Siehe Kapitel 3.7.2 „Auslösende Faktoren: Physikalische/Mechanische Einflüsse“ S. 134.
582 Wehlte 1958.
583 Details zu den Bedingungen befinden sich in Kapitel 6.1.2 „Künstliche Alterung“ S. 205ff.

Belichtung der Gewebe durch Tageslicht, sowie Belichtung mit einer Xenonbogenlampe unter Verwendung von Filtern, die Tageslicht hinter Fensterglas simulieren. Anschließende Alterung im Klimaschrank bei 70 °C und zyklisch schwankender Umgebungsfeuchte zwischen 30 und 80 %rF für jeweils 12 h. Während der klimatischen Alterung wurde ein Teil der Gewebe nach der holländischen Spannmethode aufgespannt.

5.1.3 Bleichen neuer Gewebe

Das Bleichen der Gewebe sollte historischen Verfahren entsprechen, weil es nach derzeitigem Kenntnisstand nicht klar ist, wie sich moderne und historische Bleichverfahren unterschiedlich auf das Sorptionsverhalten auswirken. Diese Vorgabe wurde erfüllt durch die Verwendung von Geweben, die von Studierenden der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart mittels Rasenbleiche gebleicht wurden.

5.1.4 Charakterisierung der Gewebe durch die Gewebestrukturanalyse

Um Gewebe möglichst exakt zu charakterisieren besteht in der Konservierungswissenschaft die Möglichkeit der Gewebestrukturanalyse. Rouba zeigt auf, dass strukturelle Eigenschaften eines textilen Bildträgers in engem Zusammenhang mit Schäden der gesamten Gemäldestruktur stehen können.[584] Eine systematische Auswertung dieser Zusammenhänge ist bisher nicht erfolgt, jedoch setzt sich das Erfassen bestimmter Merkmale des Gewebes im Zuge seiner Dokumentation in der Konservierungswissenschaft immer mehr durch. In der vorliegenden Arbeit soll die Analyse der Gewebestruktur hauptsächlich der Beschreibung der Ausgangsgewebe dienen und ihrer Veränderung während der künstlichen Alterung. Schriftliche Grundlagen zur Umsetzung der Gewebestrukturanalyse für textile Bildträger sind von Rouba und Lipinski erarbeitet worden.[585] Lipinski beschäftigt sich auf der Grundlage Roubas mit einzelnen Parametern des Gewebes und macht konkrete Vorschläge für deren Erstellung vor allem mit Hilfe digitaler Bildbearbeitung. Es hat sich allerdings bisher kein allgemein gültiges Vorgehen für die Erstellung der Gewebestrukturanalyse durchgesetzt.
An der HfBK Dresden hat sich auf Grundlage von Rouba und Lipinski die Erfassung folgender Merkmale am Leinwandgemälde etabliert, welche auch im Rahmen dieser Arbeit erfasst werden sollten:

- Größe des Gewebes
- Bestimmung des Verlaufes von Kette und Schuss

584 Rouba 1992.
585 Rouba 1992 und Lipinski 2006.

- Faserart
- Bindungsart
- Konstruktion, Drehrichtung und Fasersteigungswinkel des Garns
- Fadendichte
- Garnbreite
- Gewebefüllung

In der vorliegenden Arbeit werden zusätzlich die Erfassung folgender Merkmale diskutiert. Diese wurden nicht systematisch an den verwendeten Geweben erfasst, kommen jedoch im experimentellen Teil aus verschiedenen Gründen zur Sprache:

- Faser- und Garnfeinheit
- Gewebedicke
- Flächengewicht

Größe des Gewebes

Die Größe des Gewebes macht hauptsächlich im Kontext als Funktion des Bildträgers eines Leinwandgemäldes Sinn und wird in dieser Arbeit nur bei der Durchführungsbeschreibung des jeweiligen Versuches angegeben, sofern es für die Methode relevant ist.

Bestimmung des Verlaufes von Kette und Schuss

Die Angabe zum Verlauf von Kett- und Schussfaden macht ebenfalls für Gewebe als Bildträger Sinn. Eine eindeutige Zuordnung kann strenggenommen nur beim Vorhandensein einer Webkante erfolgen. Alle anderen Indizien wie z. B. unterschiedliche Garnqualitäten oder der Grad der jeweiligen Einarbeitung können Anhaltspunkte sein, liefern jedoch keine eindeutigen Bestimmungskriterien.[586] Für die in dieser Arbeit verwendeten Gewebe ist es vor allem relevant bei den jeweiligen Versuchen zu benennen, aus welcher Webrichtung die Probenentnahme erfolgte. Sofern Kett- und Schussfäden nicht eindeutig bestimmt werden können werden die Richtungen mit R1 (horizontal verlaufendes Garn) und R2 (vertikal verlaufendes Garn) benannt.

Faserart

Für die Bestimmung der Faserart hat sich in der Konservierungswissenschaft ein mikroskopisches Vorgehen etabliert, welches sowohl Durchlicht als auch polarisiertes Licht beinhaltet.[587] Es sind immer beide Webrichtungen zu bestimmen.

586 Zenker 1998, S. 346.
587 Wülfert, S. 244—308.

Bindungsart

Für die Beschreibung der Bindungsart wird von LIPINSKI die Darstellung einer Patrone mit ihrem jeweiligen Bindungsrapport vorgeschlagen um Missverständnissen vorzubeugen. Grundsätzlich empfiehlt es sich die Begriffe der Textiltechnik zu verwenden. Weil in dieser Arbeit ausschließlich Gewebe in Leinwandbindung verwendet werden, und diese Bindungsart eindeutig definiert ist, wird auf die Darstellung einer Patrone verzichtet.

Konstruktion, Drehrichtung und Fasersteigungswinkel des Garns

Die Konstruktion des Garns soll den Aufbau beschreiben, ob es sich um ein einfaches Garn handelt, oder einen Zwirn, den es gegebenenfalls zu beschreiben gilt. Die Drehungsrichtung zeigt, in welcher Richtung die Fasern zum Garn verdreht sind. Sie wird durch die beiden großen Buchstaben Z (Z-Drehung) und S (S-Drehung) gekennzeichnet. Bei senkrecht gehaltenem Garn verläuft die Drehungsrichtung parallel dem Schrägstrich des entsprechenden Buchstabens.[588]

Zur Beschreibung wie stark das Garn gedreht ist, hat sich in der Konservierungswissenschaft die Messung des Fasersteigungswinkels im Garn etabliert. In der Textiltechnik wird die Drehung t in m^{-1} bestimmt, sie beschreibt die Anzahl der Drehungen pro Längeneinheit. Die für ihre Bestimmung angewandten Methoden können nicht auf Gemälde übertragen werden, weil sie an relativ langen Garnabschnitten in speziellen Drehungsprüfgeräten durchgeführt werden. Für Spezialuntersuchungen findet jedoch ein mikroskopisches Verfahren Anwendung, welches die Drehung des Garns nach der Messung des mittleren Garndurchmessers d und des Fasersteigungswinkels β unter dem Mikroskop mit einer von HERZOG entwickelten empirischen Gleichung berechnet:[589]

$$t = \frac{1{,}133 \cdot 10^3 \cdot \cot\beta}{\pi \cdot d} \tag{5.1}$$

Der Autorin sind keine Publikationen innerhalb der Konservierungswissenschaft bekannt, die die Anwendung diese Formel beinhalten. Durch die Erfassung des Fasersteigungswinkels ist es jedoch jederzeit möglich, die in der Textiltechnik etablierte Größe Drehung t, zu berechnen. Sinnvoll kann dies sein, wenn Vergleiche zu Garnen oder Geweben gezogen werden sollen, von denen die Drehung t bereits bekannt ist.

Bei den hier vorgestellten Untersuchungen wird der Fasersteigungswinkel erfasst, ohne im Anschluss die Drehung t zu berechnen. Das Vorgehen anhand von Fotografien in einer Bildbearbeitungssoftware bietet sich an. In der Praxis hat sich die Berechnung eines Durchschnittswertes aus 10 Messungen etabliert. Ob die Anzahl der Messungen der Genauigkeit Rechnung tragen, wurde weder von ROUBA noch von LIPINSKI thematisiert.

588 THOMAS/REUMANN 2000a, S. 265.
589 THOMAS/REUMANN 2000a, S. 274.

Rouba und Lipinski schlagen vor, den Winkel β wie in Abb. 5.1 gezeigt, zu bestimmen. Dafür muss zunächst eine Bezugslinie quer zur Garnlängsachse erstellt werden. Aufgrund der kleinen Querschnitte ist dies mit einer hohen Ungenauigkeit verbunden. Die Ungenauigkeit kann verringert werden, wenn zunächst der Winkel α bestimmt wird und daraus Winkel β wie folgt berechnet wird:

$$\beta = 90 - \alpha \tag{5.2}$$

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher die Bestimmung von Winkel β nach Formel 5.2 durchgeführt.



Abbildung 5.1: Bestimmung des Fasersteigungswinkels am Garn

Fadendichte

Die Fadendichte ist durch die Anzahl der Fäden pro Längeneinheit definiert.[590] In der Konservierungswissenschaft wird häufig auch der Begriff Fadenzahl verwendet. Um die Anzahl der Fäden pro 10 mm zu erfassen, empfiehlt Lipinski das Zählen der Fäden für jede Webrichtung an zwei Orten über ein Messfeld von 20 mm und die anschließende Berechnung des Durchschnitts auf 10 mm mit einer Genauigkeit von 0,25 Fäden. In der Textilprüfung richtet sich die Mindestlänge des Messfeldes nach der Anzahl der Fäden (Tab. 5.2).[591] Das Zählen der Fäden auf einer längeren zusammenhängenden Strecke erhöht die Genauigkeit im Gegensatz zum Zählen der Fäden auf mehreren kürzeren Strecken.

590 Reumann 2000d, S. 391.
591 Reumann 2000d, S. 392.

Tabelle 5.2: Mindestlängen der Messfelder zur Erfassung der Fadendichte nach Reumann 2000d S. 392.

Anzahl der Fäden pro cm	Mindestlänge der Messfeldes in Zählrichtung in cm
< 10	10
10—25	5
25—40	3
> 40	2

Garnbreite

Die durchschnittliche Breite der Garne kann anhand von Mikroskopbildern in einer Bildbearbeitungssoftware, mit einer Genauigkeit von 0,01 mm, erfolgen. Lipinski empfiehlt 15 Messungen je Webrichtung. In der Praxis hat sich hingegen die Berechnung des Durchschnitts aus 20 Messungen etabliert.

Gewebefüllung

Die Gewebefüllung zeigt, wieviel Prozent der Gesamtfläche von Fäden bedeckt sind. In die Bestimmung der Gewebefüllung fließen die Fadendichte und die Garnbreite ein. Es wird zunächst die Füllung jeweils für Kett- und Schussfäden, und daraus die Füllung des Gewebes berechnet. Die Berechnung der Füllung für eine Webrichtung, hier z. B. Kette, erfolgt anhand der Formel:[592]

$$A_K = \frac{\text{Fadendichte} \cdot \text{Fadenlänge} \cdot \text{Garnbreite}}{\text{Fläche}} \tag{5.3}$$

Das Ergebnis wird in Prozent angegeben. Fadendichte und Fadenlänge beziehen sich auf eine vorher zu definierende Fläche. Weil die Fadendichte in der Regel auf 10 mm angegeben wird, empfiehlt es sich die entsprechende Fläche von 100 mm² zu wählen. Die Maßangaben werden in mm eingesetzt.
Die Berechnung der Füllung des Gewebes erfolgt nach Formel 5.4 und wird in Prozent angegeben.

$$A_{KS} = A_K + A_S - \frac{A_K \cdot A_S}{100} \tag{5.4}$$

Faser- und Garnfeinheit

Die Feinheit wird als Masse je Längeneinheit definiert. Hierfür existiert das international angewandte Tex-System. Das Tex-System ist auf alle linienförmigen textilen Gebilde übertragbar,

592 Rouba 1992, S. 81.

wie Fasern, Garne, Zwirne, Vorgarne u. ä. Die Feinheit im Tex-System *Tt* ist die auf eine Gesamtlänge von 1000 m bezogene Masse in g:[593]

$$Tt = \frac{m}{l} \tag{5.5}$$

Mit

$$1\,tex = \frac{1\,g}{1000\,m} \tag{5.6}$$

Die Feinheit kann entsprechend auch in dtex (Dezitex) oder mtex (Millitex) angegeben werden. Größere Zahlenwerte kennzeichnen gröbere Garne.

Für die Bestimmung nach dem sogenannten Abschnittverfahren wird ein aus dem Gewebe entnommenes Garn einer definierten Vorspannkraft ausgesetzt. Der Abstand der Klemmkanten soll dabei der erforderlichen Länge der Probe entsprechen. Die Garnabschnitte werden unmittelbar an den Klemmkanten abgeschnitten und ohne Änderung der Materialfeuchte gewogen. Die Berechnung der Feinheit erfolgt dann nach Formel 5.5. Das Garn soll im gespannten Zustand in der Regel eine Länge von 500 mm ± 0,5 mm, mindestens jedoch eine Länge von 100 mm ± 0,25 mm aufweisen. Die Vorspannkraft für die hier verwendeten Flachsgarne beträgt 0,5 cN/tex ± 0,1 cN/tex. Die Waage darf eine Fehlergrenze von 0,1 % der Masse der Probe nicht überschreiten.[594]

Durch die vorgegebene Länge des zu prüfenden Garnabschnittes schließt sich die Bestimmung der Garnfeinheit nach der genannten Vorgehensweise an historischen Proben aus. Auch von den anderen Geweben, die im experimentellen Teil verwendet wurden, stand nicht ausreichend Material zur Verfügung, die Feinheit zu bestimmen, weshalb darauf verzichtet wurde. Prinzipiell wäre es aber in Hinblick auf die Interpretation des Sorptionsverhaltens ein interessanter Aspekt.

Im Zusammenhang mit der Bestimmung der Nullzugfestigkeit war die Bestimmung der Feinheit an kleinen Garnabschnitten erforderlich, weshalb an der Stelle ein abweichendes Vorgehen für ihre Bestimmung gewählt wurde.[595] Es wäre jedoch sinnvoll, ein Verfahren zu entwickeln, die Faserfeinheit am originalen textilen Bildträger reproduzierbar und verlässlich zu erfassen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte diesem Aspekt nicht vertieft nachgegangen werden.

Gewebedicke

Die Dicke charakterisiert das Gewebe in der dritten Dimension. Im Zusammenhang mit der Fläche des Textils können Aussagen zum Volumen und zusammen mit seiner Masse zur Rohdichte und zum Porenanteil gemacht werden. In der Textiltechnik ist die Gewebedicke als der

593 Kleinhansl 2000a, S. 163.
594 Thomas/Reumann 2000b, S. 257—258.
595 Siehe Abschnitt 5.2.4 „Nullzugfestigkeit am Garnabschnitt“ S. 187.

senkrechte Abstand zwischen der Ober- und Unterseite eines Textils definiert, das sich zwischen zwei planparallelen Platten befindet. Nach Anlegen eines Messdruckes gemäß NORM DIN EN ISO 5084 wird nach einer Anpassungszeit an den Messdruck der senkrechte Abstand beider Platten gemessen.[596]
An originalen Leinwandgemälden lässt sich die Gewebedicke nicht ohne weiteres bestimmen. In der Regel liegt das Gewebe nicht ohne Grundierungs- und Malschichten vor. Der Spannrand kann hier eine Ausnahme bilden, dies hängt jedoch von der individuellen Machart des Gemäldes ab. Gelegentlich wird in der Praxis die Dicke des Gewebes am Spannrand mit einem Messschieber gemessen. Weil der Messschieber beim Messen jedoch unterschiedlich stark zusammengedrückt werden kann, ist dieses Vorgehen mit einer gewissen Ungenauigkeit behaftet. Eine Verbesserung der Genauigkeit dieser Vorgehensweise könnte mit der Verwendung von Bügelmessschrauben erreicht werden, die einen definierten Druck erzeugen. In beiden Fällen ist die Messfläche allerdings gering. Bei der Dokumentation des Ergebnisses ist unbedingt die Vorgehensweise zu benennen. Aufgrund der Ungenauigkeit empfiehlt es sich, möglichst mehrere Messungen durchzuführen.
Für die in dieser Arbeit verwendeten Gewebe konnte die Gewebedicke nicht bestimmt werden, weil das Probenmaterial hierfür nicht ausreichte.

Flächengewicht

Das Flächengewicht definiert die Masse von 1 m² des Gewebes in g/m². Die Bestimmung erfolgt an mind. fünf Proben einer Mindestgröße von 100 cm². Die Prüfung erfolgt im Normklima. Die Wägung hat auf 0,1 mg genau zu erfolgen. Das Flächengewicht lässt sich folgendermaßen berechnen:

$$m_A = \frac{m}{A} = \frac{m}{l \cdot b} \tag{5.7}$$

Dabei ist A die Fläche des Gewebes mit l = Länge und b = Breite.[597]
An historischen Bildträgern kann diese Größe nicht erfasst werden. Für die in dieser Arbeit verwendeten Gewebe liegen teilweise Angaben der Hersteller bzw. Vertreiber vor. Diese werden angegeben, die systematische Erfassung des Flächengewichtes an allen Geweben erfolgte jedoch nicht.

Zusammenfassung

In der Analyse der einzelnen Merkmale wurde klar, dass sich nicht alle für die hier durchgeführte Untersuchung eignen. Im Rahmen der Gewebestrukturanalyse wurden daher folgende

596 Reumann 2000c, S. 383—385.
597 Reumann 2000d, S. 402.

Merkmale erfasst: Bestimmung des Verlaufes von Kette und Schuss, Faserart, Bindungsart, Konstruktion, Drehrichtung und Fasersteigungswinkel des Garns, Fadendichte, Garnbreite, Gewebefüllung.

5.2 Charakterisierung der Degradation am Gewebe

In der Konservierungswissenschaft gibt es keinen Konsens darüber, wie ein degradiertes Gewebe charakterisiert werden soll. Die augenscheinliche Beschreibung des Gewebes und daraus abgeleitete Interpretationen zum Zustand des Material finden sich immer wieder vor allem in unpublizierten Berichten. Vor allem von der farblichen Erscheinung des Gewebes werden Bezüge zu seinem Abbaugrad hergestellt.[598] Eine solche empirische Herangehensweise kann jedoch keine objektive Zustandsbeschreibung hervorbringen. Im Folgenden wird diskutiert, welche Methoden für die Charakterisierung von degradierten Geweben in Frage kommen, die teilweise auch gleichzeitig mit der Materialfeuchte in Zusammenhang gebracht werden sollen.

5.2.1 Messung des pH-Wertes

Der pH-Wert gibt Aussage über die Konzentration der Hydroniumionen (H_3O^+) einer wässrigen Lösung. Weil es sich in der Praxis unvorteilhaft erwiesen hat, mit Zahlen mit negativen Exponenten oder ihrer dezimalen Entsprechung zu hantieren, wird der pH-Wert als negativer dekadischer Logarithmus ausgedrückt, sodass nur der Exponent verwendet werden muss. Die pH-Skala reicht von 0 bis 14. Niedrige Zahlenwerte kennzeichnen eine hohe H_3O^+-Konzentration und werden bis zu einem Wert von 7 als sauer bezeichnet. Analog stehen hohe Zahlenwerte über 7 für den basischen Bereich mit einer niedrigen H_3O^+-Konzentration. Bei pH-Wert 7 ist die Konzentration von H_3O^+ und OH^- gleich groß, die Lösung ist hinsichtlich ihres Säure-Base-Verhältnisses neutral. Die Änderung des pH-Wertes um eine Einheit bedeutet eine Veränderung der H_3O^+-Konzentration um das 10-fache.[599]
Der hydrolytische Abbau von Cellulose wird durch die Präsenz von Hydroniumionen deutlich beschleunigt, sie wirken als Katalysator. Insofern hat der pH-Wert eine gewisse Aussagekraft über die zukünftige Alterungsbeständigkeit des Materials. Er wird darüber hinaus aber auch zur Beurteilung der bereits abgelaufenen Degradation herangezogen. Während des oxidativen

598 Rouba 1992, S. 89 Anmerkung 11.
599 Banik 2015, S. 77—78.

Abbaus der Cellulose entstehen vermehrt Carboxylgruppen, die in wässriger Lösung sauer reagieren.[600]

In der Papierkonservierung ist die Messung des pH-Wertes weit verbreitet, weil daraus eine direkte Entscheidung abgeleitet werden kann, ob das Papier entsäuert werden soll.[601] Bei der Entsäuerung von Papieren soll der weitere Abbau des Materials reduziert werden, indem eine alkalische Reserve in das Material eingebracht wird. Die im sauren Milieu ablaufende Hydrolyse soll dadurch reduziert werden. Einen vergleichbaren Stellenwert hat die Messung des pH-Wertes in der Gemäldekonservierung nicht. Es gibt Untersuchungen, das Verfahren der Entsäuerung auch an textilen Bildträgern anzuwenden, in die Praxis ist dies jedoch noch nicht übertragen worden.[602]

Methoden zur Messung des pH-Wertes am textilen Bildträger

Eine Herausforderung der Messung des pH-Wertes am textilen Bildträger ist das feste Material, denn die pH-Wert Messung muss in wässriger Lösung erfolgen. Aus diesem Grund sieht die Norm DIN 3071 die Messung des wässrigen Extraktes vor.[603] Die Messung des wässrigen Extraktes erfordert das Einlegen einer gewissen Menge des Textils in Wasser, von welchem dann der pH-Wert gemessen wird. In der Regel erfolgt die Messung der Lösung potentiometrisch mit einer Glaselektrode. Für Textilien ist die Herstellung eines Kaltextraktes vorgesehen. Die genannte Norm verlangt drei Proben von jeweils 2 g. Am Beispiel des im experimentellen Teils verwendeten Gewebes N1 entspricht das drei Quadraten, mit einer jeweiligen Kantenlänge von ca. 7,5 cm. Derart große Gewebestücke können in der Regel nicht von historischen Bildträgern entnommen werden. An verschiedenen Stellen wurde bereits bewiesen, dass es auch mit kleineren Probemengen gelingt, verlässliche Ergebnisse zu generieren.[604] Bei Vuori et al. wurde mit einer Gewebemenge von 0,001 g gearbeitet. Für das schon erwähnte Gewebe entspricht diese Masse einem Quadrat der Kantenlänge von ca. 1,8 mm. Die Anwendung an historischen Bildträgern wird damit möglich, muss jedoch im Einzelfall abgewogen werden. Für Papier und Pappe existiert neben dem Verfahren des Kaltextraktes aus die Messung des Heißextraktes.[605] Gelegentlich wird diese Methode auch für Textilien angewandt.[606]

Alternativ zur Messung des wässrigen Extraktes kann die Messung des pH-Wertes an der Oberfläche des Gewebes durchgeführt werden. Fraglich ist jedoch, ob die Messung an der Oberfläche dem Zustand im Inneren des Materials entspricht, da bisher nicht untersucht wurde, ob Gewebe über ihren Querschnitt gleichmäßig altern. Die Eindringtiefe von UV-Strahlung

600 Siehe Kapitel 3.7.1 „Degradationsmechanismen: Oxidation der Cellulose“ S. 127.
601 Banik/Brückle 2015, S. 561.
602 Zumbühl/Scherrer 2003 und Rizzo/Burnstock 2003.
603 NORM DIN EN ISO 3071.
604 Vuori/Tse 2004 und Drexler 1999.
605 NORM DIN 53124.
606 Drexler 1999.

in Holz beträgt 75 µm, sichtbares Licht dringt bis zu 200 µm tief ins Holz ein.[607] Vergleichbare Werte für Gewebe wurden allerdings nicht gefunden. Man kann davon ausgehen, dass die lichtinduzierten Reaktionen zunächst zu einem erhöhten Anteil an der Oberfläche des Materials stattfinden. Welche Aussagekraft dieser Messwert hat, ist nicht zweifelsfrei geklärt. Aufgrund der einfacheren Durchführung findet die Messung an der Oberfläche dennoch häufig Anwendung.

An der Oberfläche wird der pH-Wert in der Praxis der Gemälderestaurierung häufig mit nicht blutenden Indikatorpapieren durchgeführt. Dabei wird entweder das Indikatorstäbchen oder das Gewebe befeuchtet und dann das Indikatorstäbchen auf die Gewebeoberfläche gedrückt wird. Alternativ werden auch entnommene Faserproben auf die Oberfläche des Indikatorstäbchens gelegt. Drexler zeigte, dass diese Methode der pH-Wert Bestimmung im Vergleich zu der Bestimmung des Heißextraktes jedoch nur bedingt aussagekräftig ist. Verbessern lässt sich die Aussagekraft wenn gewährleistet wird, dass CO_2 aus der Luft ausgeschlossen wird, dass heißt die Arbeit muss z. B. unter Stickstoffatmosphäre durchgeführt werden.[608]

Neben den Indikatorstäbchen sind im Handel Oberflächenelektroden erhältlich, die nach dem potentiometrischen Prinzip arbeiten. Aber auch hier wurde sowohl für Papier als auch für Textilien nachgewiesen, dass die Messung des wässrigen Extraktes präzisere Ergebnisse hervorbringt.[609] Obwohl die Messung des wässrigen Extraktes als präziser gilt, wurde bei Messungen an Papier festgestellt, dass auch die Oberflächenelektrode reproduzierbare Werte liefert, sofern die Größe des Messfeldes und die Menge des Wassers identisch gewählt werden. Die Ergebnisse lagen jedoch insgesamt etwas niedriger im Vergleich zu den Werten des wässrigen Extraktes.[610]

Die Bedeutung der Wasserqualität für die Messergebnisse wurde von Drexler erarbeitet.[611] Sie schlussfolgerte, dass sich die Aussagekraft der Messung verbessern lässt, wenn bei der Anwendung von destillierten Wasser unter Ausschluss des CO_2 aus der Atmosphäre gearbeitet wird. CO_2 aus der Luft lässt das Wasser aufsäuern und nimmt dadurch Einfluss auf das Ergebnis.

Für vergleichende Messungen ist es neben der Qualität des Wassers entscheidend, das Verhältnis von Wasser zu Textil, die Dauer der Extraktion und das Messinstrument beizubehalten.[612]

Die Aussagekraft des pH-Wertes ist in jedem Einzelfall kritisch zu bewerten, da das Ergebnis von im Gewebe eingebrachten Materialien aus der Produktion (Schlichte und Appretur) oder der Verarbeitung zum Gemälde (diverse Bindemittel) sowie Staub- und Schmutzablagerungen beeinflusst werden kann. Das trifft insbesondere auf die Messungen an der Oberfläche des Materials zu. Insofern gilt der Auswahl des Messpunktes besondere Aufmerksamkeit.

607 Hon 1981, S. 230—231.
608 Drexler 1999, S. 21.
609 Saverwyns et al. 2002 und Vuori/Tse 2004.
610 Saverwyns et al. 2002.
611 Drexler 1999, S. 19—21.
612 Vuori/Tse 2004, S. 14.

Innerhalb einer Seminararbeit wurde an der HfBK Dresden eine bislang noch nicht erprobte Methode zur Bestimmung des pH-Wertes von textilen Bildträgern mittels chemischer Sensoren untersucht.[613] Dabei wird der wässrige Extrakt der Fasern oder auch Faserproben direkt auf eine polymere Schicht gebracht, in die pH-sensitive Indikatoren eingebettet sind. Diese Indikatoren werden durch die Bestrahlung mit verschiedenen Wellenlängen zu Fluoreszenz angeregt oder weisen mittels der Absorption bestimmter Wellenlängen Farberscheinungen auf. Die Auswertung kann mit einer im Mikroskop integrierten CCD-Kamera oder mit einem Spektrophotometer erfolgen. Die Untersuchung zeigte, dass die chemischen Sensoren und deren Anwendung im Zusammenwirken mit der geeigneten Methode zur Auswertung noch nicht so weit ausgereift sind, dass sie am textilen Bildträger angewandt werden können und noch weiterer Forschungsbedarf besteht.
Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass nach derzeitigem Forschungsstand die potentiometrische Messung des wässrigen Extraktes die exakteste Methode für die Bestimmung des pH-Wertes von Faserproben ist. Empfehlenswert ist die Anwendung von destilliertem Wasser unter Ausschluss von CO_2 aus der Umgebungsluft. Für eine alternative Messung an der Oberfläche des Gewebes verspricht die Anwendung einer potentiometrischen Oberflächenelektrode die besten Ergebnisse. Im experimentellen Teil dieser Arbeit sollen Gewebe gemessen und verglichen werden, deren zur Verfügung stehende Größe teilweise stark variiert. Für die Anwendung der potentiometrischen Messung des wässrigen Extraktes steht nicht für jede Gewebeprobe ausreichend Material zur Verfügung. Um die Vergleichbarkeit zu gewährleisten, sollten alle Gewebe mit der identischen Methode gemessen werden. Aus diesem Grund wurde eine potentiometrische Oberflächenelektrode verwendet.

5.2.2 Bestimmung der Kettenlänge der Cellulose

Die Degradation von Cellulose geht in der Regel mit ihrer Depolymerisation einher. Daher gilt der Polymerisationsgrad als ein aussagekräftiger Parameter über den Zustand der Cellulose. Auch in der Konservierungswissenschaft wird dieser Wert sowohl für Papier als auch für Textilien häufig herangezogen wenn es um die Beschreibung des Zustandes geht. Für die Beurteilung der bereits erfolgten Degradation des Materials ist er jedoch bedingt aussagekräftig, weil der ursprüngliche Polymerisationsgrad in der Regel unbekannt ist.
Native Cellulose ist in Bezug auf ihren Polymerisationsgrad nicht einheitlich. Weil sie aus Ketten unterschiedlicher Länge besteht, wird der Polymerisationsgrad in der Regel als Durchschnittswert (DP) angegeben.[614] Eine genauere Beschreibung kann über die Kettenlängenverteilung erfolgen. Sie ist entscheidend für den strukturellen Aufbau und die chemischen Reaktionen der Cellulose.[615] Die Kettenlängenverteilung ist durch die Bestimmung der Molmassen-

613 Lindner 2012.
614 Siehe Kapitel 3.2.1 „Cellulose: Molekulare Ebene“ S. 43.
615 Klemm et al. 1998, S. 12.

verteilung möglich. Ihre Bestimmung ist in der Regel relativ komplex und aufwendig. Die Cellulose wird dazu in Lösung gebracht, chromatographisch getrennt und die Molmasse im Anschluss durch Lichtstreuung bestimmt.[616] Mit weniger Aufwand verbunden soll ein neuer Ansatz sein, der die Analytische Ultrazentrifugation einsetzt.[617] In der Konservierungswissenschaft ist die Bestimmung der Molmassenverteilung wenig verbreitet, wesentlich häufiger findet man Werte für den DP.
Der durchschnittliche Polymerisationsgrad steht in engem Zusammenhang mit physikalischen Eigenschaften der Cellulose und kann durch die Bestimmung dieser ermittelt werden. Die zur Verfügung stehenden Methoden beruhen auf Messungen an der gelösten Cellulose: Bestimmung eines Gewichtsmittelwertes durch die Lichtstreuung, Messung des osmotischen Drucks oder die Sedimentationsmessung mittels Ultrazentrifuge. Eine apparativ weniger aufwendige Methode ist die Messung der Viskosität von Celluloselösungen mit Hilfe eines Kapillarviskosimeters.[618]

Kapillarviskosimetrie

Das Messprinzip des Kapillarviskosimeters beruht auf der Bestimmung der Ausflusszeit eines Flüssigkeitsvolumens aus einer dünnen Kapillare. Diese ist abhängig von der Konzentration, dem Lösungsmittel und der Temperatur. Je kürzer die Molekülketten des Polymers sind, um so geringer ist die Viskosität ihrer Lösung.
Für die Viskosimetrie muss die Cellulose in eine gelöste Form überführt werden. Hierfür sind folgende Lösungsmittel möglich: Kupfertetraminhydroxyd (Cuoxam), Kupferethylendiamin (Cuen) und Eisen(III)-Weinsäure-Natriumkomplex gelöst in Natronlauge ($EWNN_{mod(NaCl)}$). Darüber hinaus kann Cellulose auch nach der Durchführung einer Nitrierung als Cellulosenitrat in Aceton gelöst werden (Nitratverfahren). Der Vergleich dieser vier Varianten zeigte, dass sich die Verfahren im apparativen und zeitlichen Aufwand unterscheiden, jedoch in ihrer Genauigkeit durchaus vergleichbar sind.[619] Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Lösungsmittel $EWNN_{mod(NaCl)}$ gewählt, weil es während der Messung gegenüber Luftsauerstoff und Licht relativ unempfindlich ist. Gegenüber den anderen Lösungsmitteln besitzt $EWNN_{mod(NaCl)}$ ein geringeres Lösungsvermögen gegenüber Cellulose, was durch eine relativ lange Schütteldauer der Lösung ausgeglichen werden kann.[620]
Die Ergebnisse der Viskosität, die durch die Verwendung verschiedener Lösungsmittel bestimmt werden, weichen erheblich voneinander ab. Ein direkter Vergleich untereinander ist da-

616 Henniges/Potthast 2015, S. 294.
617 Bernhard/Oppermann 2004.
618 Krause/Schempp 1991, S. 48.
619 Agster 1963, S. 577—578.
620 Jayme/El-Kodsi 1970, S. 502.

her nicht möglich.[621] Weil sich in der Konservierungswissenschaft bisher kein Verfahren etabliert hat, ist es oft nicht möglich publizierte Werte direkt miteinander zu vergleichen.
Zur Durchführung der Kapillarviskosimetrie eignen sich Kapillarviskosimeter unterschiedlicher Konstruktion (Ostwald-, Ubbelohde-, Freiflußviskosimeter).[622] Gemessen werden die Durchflusszeit der Lösung t und die Durchflusszeit des Lösungsmittels t_0 in Sekunden. Zusammen mit der Konzentration c der Lösung in g/ml lassen sich folgende Parameter berechnen:[623]

Relative Viskosität

$$\eta_{rel} = \frac{t}{t_0} \tag{5.8}$$

Relative Viskositätsänderung (spezifische Viskosität)

$$\eta_{spez} = \frac{t - t_0}{t_0} \tag{5.9}$$

Viskositätszahl

$$\text{Viskositätszahl} = \frac{\eta_{spez}}{c} \tag{5.10}$$

Diese Parameter sind von der Konzentration der Lösung abhängig. Die konzentrationsunabhängige Grenzviskositätszahl (GVZ) gilt als Maßzahl für die Viskosität einer Celluloselösung und wird auch Staudinger-Index genannt. Diese wird nach der Schulz-Blaschke-Gleichung berechnet und in ml/g angegeben:

$$\eta = \frac{\eta_{spez}/c}{1 + k_\eta \cdot \eta_{spez}} \tag{5.11}$$

k_η ist eine Konstante, die für Cellulose und das genannte Lösungsmittel gilt, mit einem Wert von 0,339.[624]
Aus der GVZ kann der durchschnittliche Polymerisationsgrad berechnet werden. Diese Berechnung stützt sich auf Annahmen und Formeln, die je nach Herkunft der Formeln und Art der Ausgangsmaterialien Unterschiede aufweisen, die für das gleiche Material deutlich abweichende Werte liefern können.[625] Stoll/Fengel zeigen anhand unterschiedlicher Gewebeproben, dass die Berechnung anhand von Gleichungen unterschiedlicher Autoren vor allem für hohe Polymerisationsgrade stark abweichende Ergebnisse liefern. Bei niedrigen Werten des DP verringern sich die Unterschiede und liegen teilweise auch innerhalb der Fehlergrenze der Messmethode.[626] Es ist bei einem Vergleich von Ergebnissen aus anderen Messungen darauf zu achten, ob sowohl die Messmethode als auch der Rechenweg für die Bestimmung des DP

621 NORM DIN 54270-1; Agster 1968; Stoll/Fengel 1982.
622 NORM DIN 54270-1.
623 NORM DIN 54270-3.
624 NORM DIN 54270-3, S. 3.
625 NORM DIN 54270-1.
626 Stoll/Fengel 1981, S. 180.

identisch ist. Zum Vergleich sei an dieser Stelle auf die Zusammenstellung von publizierten Daten des DP in Tabelle 3.1, S. 44 verwiesen.
Die NORM 54270-1 erachtet die Berechnung des DP aus der GVZ für nicht sinnvoll, da bis zur Berechnung der GVZ die Messungen und Auswertungen ausreichend genau definiert sind und der DP darüber hinaus keine weiteren Informationen enthält. Insofern ist die Zweckmäßigkeit der Berechnung des DP in Frage zu stellen. In dieser Arbeit werden die Werte der GVZ bestimmt und auf die Berechnung des DP verzichtet. Um die Vergleichbarkeit der ohnehin wenigen publizierten Daten zu verbessern, wäre es wünschenswert wenn es sich in der Konservierungswissenschaft etablieren würde, die GVZ zu nennen.
Die Bestimmung der Grenzviskositätszahl von Cellulose in $EWNN_{mod(NaCl)}$ ist in der Norm DIN 54270-3 beschrieben. Für die hier vorgestellten Experimente stand ein Ubbelohde-Viskosimeter mit hängendem Kugelniveau zur Verfügung, was in DIN 51562 (Teile 1—4) beschrieben ist.[627] Bei der Anwendung des Ubbelohde-Viskosimeters Typ 501 13/Ic ist für die Durchführung von zwei Messungen insgesamt eine Lösungsmenge von 50 ml erforderlich. Dafür werden 14 mg Fasermaterial benötigt. Durch die Anwendung eines kleineren Ubbelohde-Viskosimeters kann die Menge weiter reduziert werden. Dieses Beispiel zeigt, dass die erforderliche Probenmenge die Anwendung des Verfahrens im Rahmen dieser Arbeit für alle Proben erlaubt, einschließlich der historischen Proben.
Die Konzentration der Celluloselösung c wird in g/ml angegeben, wobei sich die Masse des Fasermaterials auf den ofentrockenen Zustand (m_{tr}) bezieht. Das heißt, dass vom eingewogenen „feuchten" Material (m_f) die Masse der enthaltenen Feuchte (Feuchtezuschlag) abgezogen werden muss. Der Feuchtezuschlag kann durch die vollständige Trocknung bei 105 °C bestimmt werden. Die sich daraus ergebene Änderung der Konzentration spiegelt sich im Ergebnis der GVZ wieder. Diese Änderung ist nicht unerheblich, wie eine beispielhafte Berechnung in Tab. A.1 (S. 294) zeigt. Die Änderung der GVZ entspricht nahezu dem Wert des Feuchtezuschlags. So führt eine Berücksichtigung des Feuchtezuschlags von 7,5 % zu einer Änderung der GVZ von nahezu 7,5 %.

5.2.3 Bestimmung der Kristallinität der Cellulose

Das Verhältnis von amorphen zu kristallinen Bereichen innerhalb der Cellulose wird in der Regel durch den Kristallinitätsindex ausgedrückt. Für die Untersuchung von Cellulose basierten textilen Bildträgern hat sich die Bestimmung des Kristallinitätsindexes bisher nicht etabliert. Ergebnisse sind in Publikationen nur vereinzelt zu finden.[628] Weil die Ergebnisse von der verwendeten Methode abhängen, ist ein Vergleich dieser wenigen Daten nicht ohne weiteres möglich.[629]

627 NORM DIN 51562-1.
628 Siehe Tabelle 3.2, S. 50.
629 Park et al. 2010.

Prinzipiell kommen für die Erfassung des Kristallinitätsindexes an Cellulose die Röntgendiffraktion im Bereich der Weitwinkelstreuung, die Kernspinresonanz, die Infrarot-Spektroskopie und die Raman-Spektroskopie in Frage.[630] Außerdem werden Werte der Kristallinität aus der Dichte und Feuchteaufnahmefähigkeit der Cellulose abgeleitet.[631]
Von den genannten Methoden gilt die Weitwinkel-Röntgendiffraktion heute als die Methode, welche die direktesten Ergebnisse erzeugt. Dennoch ist die Methode und die Interpretation ihrer Ergebnisse immer noch in Diskussion.[632] Weil sie als Standardverfahren gilt, wird sie bei der Anwendung alternativer Methoden häufig als Referenz-Bestimmung herangezogen. Es ist jedoch ein teures und zeitaufwendiges Verfahren, welches gut gewartete Geräte verlangt und eine gewisse Erfahrung im Umgang mit der Technik erfordert.[633] Für die hier vorgestellten Untersuchungen stand keine entsprechende Ausrüstung zur Verfügung, um den Kristallinitätsgrad mit Röntgendiffraktion zu bestimmen. Stattdessen wurde die Infrarot-Spektroskopie gewählt. Sie erfordert keine Probenpräparation und ist in der Konservierungswissenschaft als gängiges Untersuchungsinstrument zugänglich. Insofern soll diese Methode auch hinsichtlich ihrer Anwendbarkeit in der Konservierungswissenschaft überprüft werden.

Bestimmung der Kristallinität mittels Infrarot-Spektroskopie

Die Infrarot-Spektroskopie (IR-Spektroskopie) wurde für die Bestimmung der Kristallinität von Flachsfasern bereits von Kavkler et al. angewandt.[634] Darüber hinaus wurde ihre Anwendung innerhalb der Konservierungswissenschaft für die Bestimmung an Baumwolle[635] und Papier[636] publiziert. Auch Garside/Wyeth haben u. a. an Flachs- und Hanffasern mittels IR-Spektroskopie die Kristallinität untersucht.[637] Dabei gelang es ihnen, neben der Bestimmung des üblichen Kristallinitätsindexes hinaus, jenen Anteil zu quantifizieren, der innerhalb der kristallinen Bereiche in einer Vorzugsrichtung orientiert ist. Dieser Teil liegt z. B. in den hoch geordneten parallelisierten Mikrofibrillen der Sekundärwand der Elementarzelle vor.[638] Auch der Winkel, in dem die Fibrillen in der Zellwand angeordnet sind, kann so bestimmt werden. Diese zusätzlichen Informationen konnten die Autoren gewinnen, indem sie einen polarisierten Infrarotstrahl eingesetzt haben.
Nelson/O'Connor haben 1964 die heute als Grundlage geltende Basis für die Anwendung der IR-Spektroskopie zur Bestimmung des Kristallinitätsgrades für Cellulose gelegt.[639] Ihr Prinzip

630 Park et al. 2010 und Krässig 1993, S. 88.
631 Nelson/O'Connor 1964.
632 Krässig 1993, S. 88.
633 Röder et al. 2006, S. 85.
634 Kavkler et al. 2011.
635 Chen 1998, S. 87—89.
636 Havermans 1995, S. 63—64.
637 Garside/Wyeth 2003.
638 Siehe Abbildung 3.1, S. 36.
639 Nelson/O'Connor 1964.

beruht auf den Unterschieden, wie C-H Molekülgruppen in amorphen und kristallinen Bereichen schwingen. Für Cellulose haben Nelson/O'Connor bei den Banden bei 1372—1375 cm^{-1} beobachtet, dass ein Zusammenhang mit der Kristallinität besteht. Die Bande bei 1372 cm^{-1} wurde für die Kristallinität gewählt, weil sie weder von der Menge des gebundenen Wassers, noch von der Art des Kristallgitters (Cellulose I oder II) beeinflusst wird. Es handelt sich um die C-H Deformationsschwingung. Um das Maß der Kristallinität zu bestimmen, setzten sie eine von der Kristallinität nicht beeinflusste Bande dazu ins Verhältnis, welche bei 2900 cm^{-1} liegt (C-H und CH_2 Valenzschwingung bzw. Streckschwingung).

Die Bewertung der Methode fand über eine parallele Bestimmung der Kristallinität mittels Röntgendiffraktion, Berechnung der Kristallinität über die Bestimmung der Dichte und Berechnung der Kristallinität über die Feuchteaufnahmefähigkeit bei 65 %rF statt. Die Röntgendiffraktion und Dichtemessungen hängen beide von der Menge und Größe größerer Einheiten der supramolekularen Struktur ab, der Kristallite, und korrelieren untereinander gut. Die IR-Spektroskopie wird jedoch von individuellen Molekülen bzw. Atomgruppen im Molekül bestimmt. Aus diesem Grund liegt die Übereinstimmung dieser beiden Methoden mit der IR-Spektroskopie (Übereinstimmungskoeffizienten 0,86 und 0,88) unterhalb der Übereinstimmung mit den Ergebnisse die über die Feuchteaufnahmefähigkeit (Übereinstimmungskoeffizient 0,92) ermittelt wurden. Beim Vergleich entsprechender Werte muss die Methode also berücksichtigt werden.[640]

Die IR-Spektroskopie wurde in der Konservierungswissenschaft von verschiedenen Autoren übernommen. Kavkler et al. validierten anhand von Textilfasern die von Nelson/O'Connor ausgewählten Banden und verglichen sie mit einem zweiten Paar, welches sie in gleicher Vorgehensweise zueinander ins Verhältnis setzten (1430 cm^{-1} und 897 cm^{-1}). Das von Nelson/O'Connor definierte Verhältnis wurde in diesem Vergleich als das sinnvollere bewertet was dafür spricht, diese Methode zu übernehmen.[641] Garside/Wyeth zeigten, dass die von Nelson/O'Connor definierten Banden auch unter Anwendung der ATR-FTIR anwendbar sind.[642]

Dass die Methode der IR-Spektroskopie eine hohe Übereinstimmung mit Werten hat, die über die Feuchteaufnahmefähigkeit ermittelt wurden, lässt die Methode für das hier vorgestellte Vorhaben besonders geeignet erscheinen. Die Sorptionsfähigkeit der jeweiligen Fasern sollte sich demnach in den Kristallinitätswerten, die durch IR-Spektroskopie ermittelt werden, widerspiegeln. Ist dem IR-Spektroskop ein Mikroskop angeschlossen, hat es den weiteren Vorteil, dass man die Probe vor der Messung mikroskopisch in einer hohen Vergrößerung studieren kann und den Messpunkt entsprechend exakt auswählen kann.

640 Nelson/O'Connor 1964, S. 1339.
641 Kavkler et al. 2011.
642 Garside/Wyeth 2004.

Auswertung der Spektren

Nelson/O'Connor ermittelten den Kristallinitätsindex (C. I.) über den Vergleich der Intensität der zwei Banden im Transmissionsminimum bei 1372 und 2900 cm^{-1}, die gemäß Formel 5.12 ins Verhältnis gesetzt werden.

$$C.I.=\frac{a_{1372\,cm^{-1}}}{a_{2900\,cm^{-1}}} \tag{5.12}$$

Je höher der C. I. ist, desto höher ist der Anteil an kristallinen Bereichen.

Positionierung der lokalen Hilfslinien

Für die Intensitätsmessung der ausgewählten Banden werden lokale Hilfslinien erstellt, über welche die Höhe der Bande gemessen wird. Die Hilfslinien befinden sich in der Regel zwischen benachbarten Transmissiumsmaxima. Die Position dieser Hilfslinien beeinflusst das Ergebnis.

Nelson/O'Connor haben ihre Hilfslinien wie in Tabelle 5.3 (S. 182) genannt, definiert (siehe auch Abb. 5.2a, S. 182). Die Position der Hilfslinie zur Messung des Transmissionsminimums bei 1372 cm^{-1} ist eindeutig definiert und kann für die hier durchgeführten Messungen übernommen werden. Es ist jedoch zu diskutieren, ob die Erstellung der Hilfslinien für das Transmissionsminimum bei 2900 cm^{-1} in gleicher Weise erfolgen soll, weil sie eher unüblich erstellt wurde: als Horizontale bei der Schulter nahe 3000 cm^{-1}. Der Grund war eine durch das Spektroskop verursachte Lücke im Spektrum. Weil keine Diskussion zur Bedeutung der Position der Hilfslinie statt fand, wurden relevante, nachfolgende Publikationen diesbezüglich ausgewertet.

Sowohl Chen als auch Kavkler et al. wandten die Methode für die Bestimmung der Kristallinität von Textilfasern an. Eine genaue Definition der lokalen Hilfslinien blieb dort aus.[643] Havermans definierte für seine Messungen an Papier die Position der Hilfslinien wie in Tabelle 5.3 genannt (siehe auch Abb. 5.2b), was auch von Sandy et al. für Papier übernommen wurde.[644]

Weil es unklar ist, wie sich die unterschiedlichen Positionierungen der Hilfslinien auf die Ergebnisse auswirkt, wurden vergleichende Auswertungen an im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Spektren durchgeführt.[645]

An drei verschiedenen Flachs Faserproben wurden zwei Varianten für die Positionierung der lokalen Hilfslinie verglichen. An den Spektren wurde keine vorherige Grundlinienkorrektur durchgeführt. Die möglichen Varianten zur Positionierung der lokalen Hilfslinien werden in Abbildung 5.2 und Tabelle 5.3, S. 182 dargestellt.

643 Chen 1998, S. 94—95 und Kavkler et al. 2011.
644 Sandy et al. 2010, S. 6.
645 Details zur Messung siehe Kapitel 6.2.3, S. 231f.

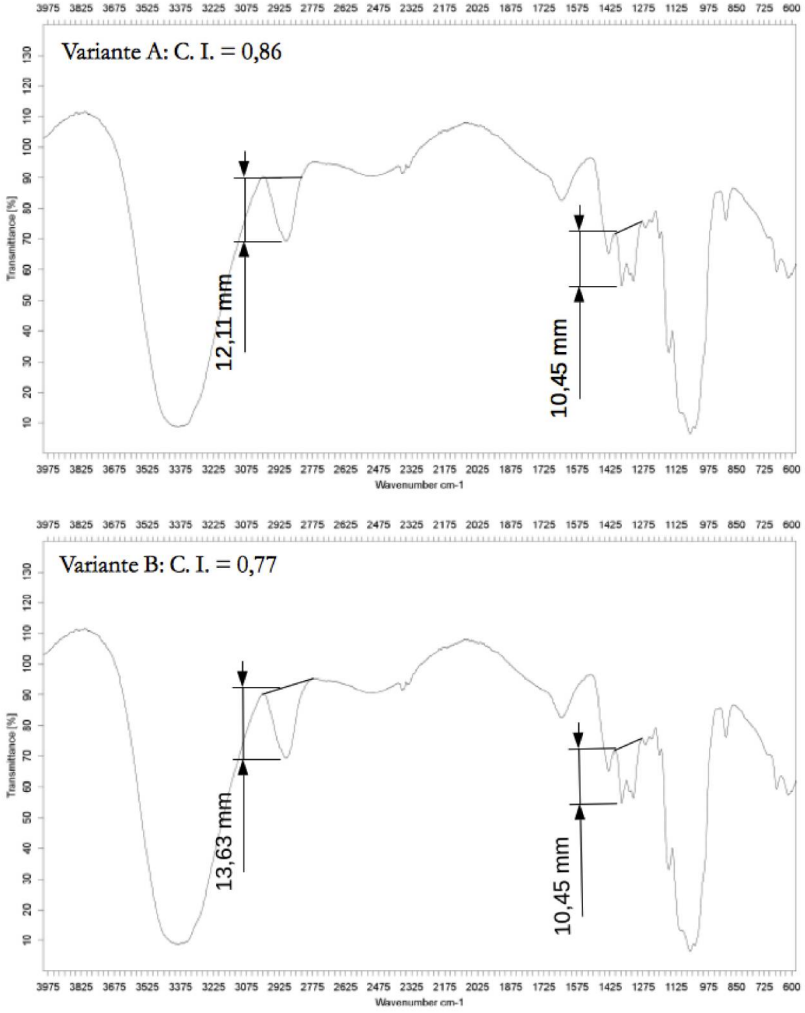


Abbildung 5.2: Beispiel für die unterschiedliche Positionierung der lokalen Hilfslinie für die Auswertung der Bande bei 2900 cm^{-1}.
Variante a nach Nelson/O'Connor, Variante b nach Havermans.

Tabelle 5.3: Vergleich zweier Varianten für die Positionierung der lokalen Hilfslinie für die Intensitätsmessung der Banden.

	Position der lokalen Hilfslinie für die Intensitätsmessung der Bande bei	
	2900 cm^{-1}	**1372 cm^{-1}**
nach Nelson/O'Connor 1964	Hilfslinie als Horizontale am benachbarten Transmissionsmaximum nahe 3000 cm^{-1}	Hilfslinie zwischen den benachbarten Transmissionsmaxima bei ca. 1290 cm^{-1} und 1410 cm^{-1}
nach Havermans 1995	Hilfslinie zwischen Transmissionsmaxima nahe 3000 cm^{-1} und 2750 cm^{-1}	Hilfslinie zwischen den benachbarten Transmissionsmaxima bei ca. 1290 cm^{-1} und 1410 cm^{-1}

Dass die unterschiedliche Positionierung der Hilfslinien das Ergebnis des Kristallinitätsindexes beeinflusst wird aus Tabelle 5.4 deutlich. Weil das Vorgehen von Havermans eine geringere Streuung der Ergebnisse erzeugt, wurde es in der hier durchgeführten Untersuchung übernommen.

Tabelle 5.4 Ergebnisse Kristallinitätsindex abhängig von der Positionierung der lokalen Hilfslinie für die Intensitätsmessung der Bande bei 2900 cm-1.

Durchschnittswert aus 15 Messungen.

Flachsproben		Variante a nach Nelson/O' Connor	Variante b nach Havermans
N1-A-X168-K4-u	C. I.	0,73	0,70
	STABW	0,09	0,08
N3	C. I.	0,80	0,70
	STABW	0,11	0,06
N3-B2	C. I.	0,76	0,75
	STABW	0,04	0,03

Durchführung einer Grundlinienkorrektur

Vor der Auswertung der Spektren führte Chen eine Grundlinienkorrektur durch, die in der Software Bruker OS2 als „Peak Picking" gekennzeichnet ist. Auch Havermans führte vor der Auswertung eine Grundlinienkorrektur durch. Dabei wurde die Intensität bei folgenden Peaks auf 0 gesetzt: 4000, 2600, 1900, 840 und 400 cm^{-1}.[646] Das gleiche Vorgehen für die Auswertung wurde auch von Sandy et al. übernommen.[647] Kavkler et al. machten in dieser Hinsicht keine Angaben über die Auswertung der Spektren.[648]

Das unterschiedliche Vorgehen in Bezug auf die Spektren wurde von den einzelnen Autoren nicht begründet oder bewertet. Es ist nicht klar, wie sich das unterschiedliche Vorgehen auf die Ergebnisse auswirkt. Aus diesem Grund wurden vergleichende Auswertungen an im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Spektren durchgeführt.

Alle Auswertungen wurden an Transmissionsspektren vorgenommen.[649]

An den Spektren der Faserproben N1 und N1-A-X168-K4-u wurden vier verschiedene Varianten in Bezug auf die Grundlinienkorrektur verglichen. Die Auswertung erfolgte an jeweils 27 Spektren. Die Berechnung des Kristallinitätsindex erfolgte nach Formel 5.12 (S. 181). Die dafür nötigen lokalen Hilfslinien wurden nahe bei den Punkten 3000 cm^{-1} und 2750 cm^{-1} bzw. 1290 cm^{-1} und 1410 cm^{-1} gesetzt.

646 Havermans 1995, S. 63.
647 Sandy et al. 2010.
648 Kavkler et al. 2011.
649 Alle anderen Messbedingungen sind Kapitel 6.2.3, S. 231f. zu entnehmen.

Es wurden vier Varianten der Grundlinienkorrektur verglichen:

1. Ohne Grundlinienkorrektur.
2. Automatische Grundlinienkorrektur in Software OPUS.
3. Grundlinie manuell auf Null gesetzt bei 3000 und 1400 cm^{-1}.
4. Grundlinie manuell auf Null gesetzt bei 3000, 2750, 1400, 1290 cm^{-1}.
5. Grundlinie manuell auf Null gesetzt bei 3000, 2750, 1400, 1350 cm^{-1}.

Die Ergebnisse sind in Abb. 5.3 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass die unterschiedlichen Grundlinienkorrekturen der Spektren die Ergebnisse verändern. Da nicht bekannt ist, welche Bedeutung diese Veränderungen für die Ergebnisse dieser Arbeit haben, wurden die Spektren in dieser Arbeit ohne vorherige Grundlinienkorrektur ausgewertet. Grundsätzlich wäre es empfehlenswert, die Kristallinität durch eine andere Bestimmungsmethode zu verifizieren bzw. die Ergebnisse damit abzugleichen, was im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht möglich war.
Die Auswirkungen durch die unterschiedlichen Auswertungsmöglichkeiten der Spektren auf die Ergebnisse macht deutlich, wie wichtig das Benennen der exakten Vorgehensweise ist, damit die Ergebnisse richtig interpretiert werden können.

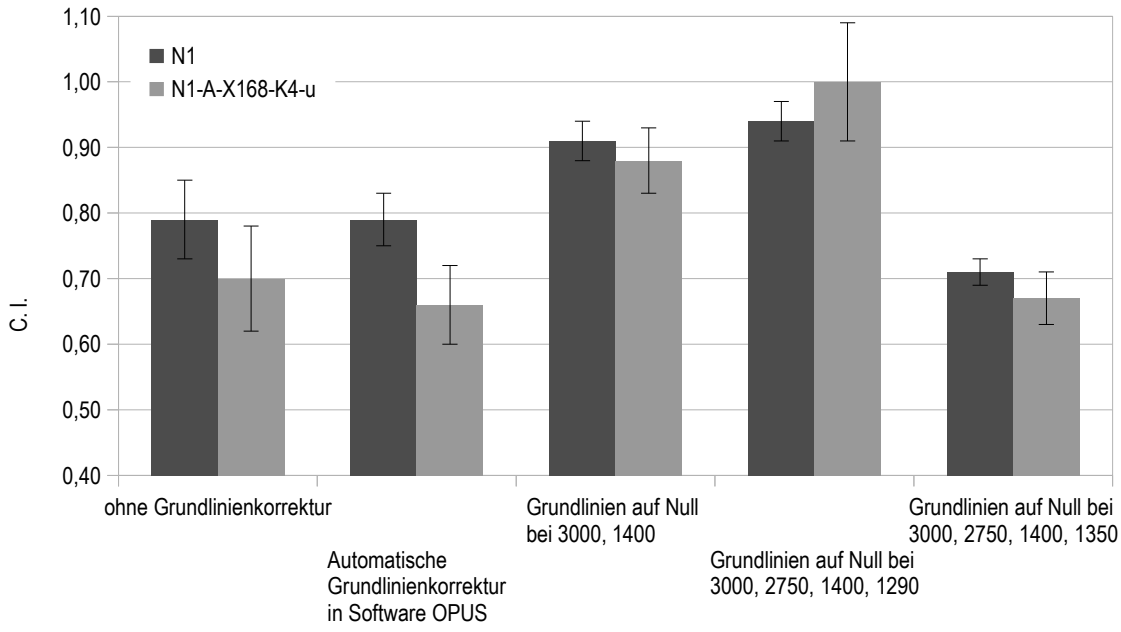


Abbildung 5.3: Ergebnisse Kristallinitätsindex (C. I.) in Abhängigkeit von verschiedenen Grundlinienkorrekturen.

5.2.4 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Eine Folgeerscheinung des Abbaus des textilen Bildträgers ist der Verlust von Festigkeit und Elastizität aufgrund der Verkürzung der Celluloseketten.[650] Diese mechanischen Eigenschaften können durch einen einfachen Zugversuch beschrieben werden, der an der Faser, am Garn oder am Gewebe durchgeführt werden kann. Für einen Teil der untersuchten Proben war die Prüfung am Gewebe möglich. Hierfür kam der einfache Streifen-Zugversuch zur Anwendung. Für die Prüfung historischer Proben konnte sich in der Gemäldekonservierung bis heute kein Verfahren etablieren, um die mechanischen Eigenschaften eines historischen textilen Bildträgers zu bestimmen. Die vorliegenden standardisierten Verfahren aus der Textiltechnik kommen aufgrund der Größe der Prüfkörper hierfür nicht in Frage. Weil im Rahmen dieser Arbeit neben neuen, auch historische Proben untersucht wurden, war es Gegenstand dieser Arbeit dafür eine geeignete Form der Festigkeitsprüfung zu entwickeln, die Nullzugfestigkeit am Garnabschnitt.

Einfacher Zugversuch

Der einfache Zugversuch kann an der Faser, am Garn und am Gewebe durchgeführt werden. Dafür wird die Messprobe einachsig mit stetig, bis zum Bruch steigender Zugkraft, belastet. Sie wird zwischen zwei Einspannklemmen einer Zugprüfmaschine eingespannt. Die ziehende Klemme bewegt sich mit konstanter Geschwindigkeit relativ zur anderen, feststehenden Klemme.[651] Zwei direkt daraus abgeleitete Größen sind die Höchstzugkraft F_H, als während des Versuchs maximal gemessene Kraft, und die zu diesem Zeitpunkt entstandene Längenänderung Δl_H. Die Höchstzugkraftdehnung ε_H ist der Quotient aus der Längenänderung Δl_H und der Ausgangslänge l_v und wird in der Regel in Prozent angegeben (siehe Formel 5.13).[652]

$$\epsilon = \frac{\Delta l_H}{l_v} \tag{5.13}$$

Häufig wird aus den genannten Größen die Zugkraft-Dehnungs-Kurve erstellt.
Die entsprechenden Vorschriften des einfachen Zugversuches wurden für die Textiltechnik entwickelt, weshalb die Probengröße in der Regel nicht auf historische Proben übertragbar ist. Die Vorschrift für die Durchführung am Garn sieht eine Ausgangslänge von l_v = 250 mm vor mit der Durchführung an 10 Messproben.[653] Die Prüfung am Gewebe ist durch den Streifen-Zugversuch beschrieben und erfordert mindestens fünf Messproben mit einer Ausgangslänge von jeweils l_v = 200 mm.[654] Steht eine geeignete Zugprüfmaschine zur Verfügung, kann die Zugprüfung an Einzelfasern in Erwägung gezogen werden. Die Ausgangslänge kann 10 mm

650 Siehe Kapitel 3.7 „Degradation der Leinwand“ 127ff.
651 Reumann 2000e, S. 68—69.
652 Reumann 2000e, S. 71—73.
653 Thomas/Reumann 2000c, S. 276 und NORM DIN EN ISO 2062.
654 NORM DIN EN ISO 13934-1.

betragen, was die Anwendung an historischen Proben möglich erscheinen lässt. Es werden 50 Einzelmessungen empfohlen.[655]
Beim Festlegen der Prüfbedingungen der Zugversuche ist zu berücksichtigen, dass die folgenden Parameter auf das Ergebnis Einfluss nehmen.
Einspannlänge:
Mit zunehmender Einspannlänge nimmt die Höchstzugkraft im Mittel einer Messreihe hyperbolisch ab, weil die Wahrscheinlichkeit des Vorhandenseins von Schwachstellen in der Messprobe bei längeren Proben größer ist als bei kürzeren. Je größer die Ungleichmäßigkeit des zu prüfenden Textilmaterials, um so stärker ist auch der Festigkeitsabfall. Aus diesem Grund ist für vergleichende Prüfergebnisse die Einspannlänge gleich zu halten.[656]
Prüfgeschwindigkeit:
Die Prüfgeschwindigkeit verändert nicht nur das Ergebnis der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung, sondern kann bei großen Unterschieden in der Verformungsgeschwindigkeit auch den Verlauf der Kraft-Längenänderungs-Kurve beeinflussen.[657]
Vorspannkraft:
Die Vorspannkraft ist ohne Einfluss auf das Ergebnis der Höchstzugkraft, verändert jedoch durch die veränderte Vordehnung das Ergebnis der Längenänderung.[658]
Klima:
Weil die Materialfeuchte Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften von Geweben Einfluss nimmt, werden die Prüfungen in der Regel unter Normalklima durchgeführt.[659]

Einfacher Streifen-Zugversuch am Gewebe

Der einfache Streifenzugversuch am Gewebe ist durch die NORM DIN EN ISO 13934-1 geregelt. Die in dieser Arbeit verwendeten Gewebe waren aufgrund ihrer vorhergehenden Belichtung im Xenotest® durch die dort vorgegebenen Probenhalterungen in der Größe definiert. Dadurch konnte die in der Norm vorgesehene Gewebegröße nicht eingehalten werden. Insofern wichen die freie Einspannlänge und Gewebebreite von der Norm ab. Die freie Einspannlänge reduzierte sich von den empfohlenen 200 mm auf 100 mm. Die Gewebebreite ist mit 50 mm ohne Fransen vorgegeben. Die Fransen entstehen durch das Ausriffeln der außerhalb der tragenden Breite liegenden Randfäden, deren seitliches Herausspringen infolge der Queerkontraktion der Meßprobe beim Zugversuch verhindert werden soll.[660] In den hier durchgeführten Versuchen betrug sie 50 mm inkl. der Fransen. Weil der Schwerpunkt dieser Arbeit auf einem Vergleich der Gewebe untereinander liegt, wurde diese Abweichung von der Norm tole-

655 Reumann 2000b, S. 181.
656 Reumann 2000e, S. 90—92.
657 Reumann 2000e, S. 93.
658 Reumann 2000e, S. 95.
659 Reumann 2000e, S. 88.
660 Reumann 2000f, S. 405.

riert. Der Vergleich mit Ergebnissen aus anderen Prüfbedingungen ist jedoch nicht ohne weiteres möglich.
Die Prüfgeschwindigkeit wird in Abhängigkeit der Höchstzugkraft-Dehnung gewählt. Für Gewebe mit einer Höchstzugkraftdehnung < 10 % liegt sie bei 50 mm/min und 10—20 % bei 100 mm/min.[661] Anhand eines Vorversuches wurde die Höchstzugkraft-Dehnung des Gewebes N1 ermittelt. Der Mittelwert aus fünf Messungen ergab einen Wert von 7,76 %. Daraus ergab sich eine Prüfgeschwindigkeit von 50 mm/min. Die Durchführung des Vorversuches wurde an dem neuen, ungewaschenen Gewebe N1 durchgeführt. Das ungewaschene Gewebe zeigte geringere Werte der Höchstzugkraft-Dehnung, als das gewaschene Gewebe. Für das gewaschene Gewebe hätte eine Prüfgeschwindigkeit von 100 mm/min gewählt werden müssen.
Der einfache Streifen-Zugversuch am Gewebe kommt nur für einen Teil der in dieser Arbeit verwendeten Probengewebe in Frage. Nicht durchführbar ist er an den historischen Proben. Hier kann die Prüfung am Garn oder an der Einzelfaser in Erwägung gezogen werden. Für eine Übertragung der Ergebnisse aus diesen Untersuchungen auf die Eigenschaften des Gewebes fehlen jedoch bisher Erfahrungen und entsprechende Untersuchungen. Im Rahmen dieser Arbeit stand für die Prüfung von Einzelfasern keine entsprechende Prüfmaschine zur Verfügung. Die in der Papiertechnik etablierte Methode der Nullzugfestigkeit bietet unter gewissen Voraussetzungen eine Möglichkeit, kleine Garnabschnitte von historischen textilen Bildträgern zu prüfen.

Nullzugfestigkeit am Garnabschnitt

In der Papiertechnik hat sich für die Erfassung der Stärke der Einzelfaser die sogenannte Nullzugfestigkeit etabliert. Dabei wird die Probe mit zwei Klammern möglichst ohne Abstand zueinander eingespannt (freie Einspannlänge ist nahezu 0) und auseinandergezogen, bis die Fasern reißen. Die allgemeinen Grundsätze des einfachen Zugversuchs haben dabei Gültigkeit. In der Papierkonservierung wird mit Hilfe dieses Tests frühzeitig eine Abnahme der mechanischen Festigkeit als Folge der Degradation erkannt.[662] Durch die Reduzierung der freien Einspannlänge auf nahezu 0 ist es denkbar, die Prüfung an sehr kurzen Garnabschnitten, auch von historischen Bildträgern, durchzuführen. Darüber hinaus werden durch diese Versuchsanordnung Einflüsse der Geometrien von Gewebe und Garn ausgeschlossen bzw. erheblich reduziert.
Obwohl das Prinzip dieser Methode bereits 1975 von Leene et al. und 1984 von Hackney/Hedley konservierungswissenschaftlich an Flachsgarnen angewandt wurde, hat es sich nicht für die Prüfung von historischen Geweben durchgesetzt bzw. weiter entwickelt.[663] Die Überprüfung der Methode bzw. Entwicklung eines standardisierten Vorgehens unter Be-

661 Reumann 2000f, S. 407.
662 Henniges/Potthast 2015, S. 284—285.
663 Leene et al. 1975; Hackney/Hedley 1984.

rücksichtigung besonderer Bedürfnisse der Konservierungswissenschaft blieb bisher aus. Um zu prüfen, ob sich diese Methode auf Garnabschnitte des textilen Bildträgers übertragen lässt, wurde eine Seminararbeit an der HfBK Dresden initiiert und betreut. Die Entwicklung der Idee, Fragestellung und Auswahl der Methode wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt, während die Entwicklung der Durchführung und die Formulierung einer Prüfvorschrift im Rahmen der Seminararbeit von Theresa Bräunig ausgeführt wurde.[664] Ziel der Untersuchung war die Anwendung der Nullzugfestigkeit auf Garnabschnitte historischer textiler Bildträger, ausgehend von dem normierten Verfahren für Papier.[665] Die Durchführung der Versuche konnten in Zusammenarbeit mit der Firma Lichtblau e. K. in Dresden realisiert werden. Die vorliegende TAPPI-Vorschrift aus der Papiertechnik wurde hinsichtlich folgender Punkte auf die Anwendung an Garnabschnitten angepasst:

- Wahl des Prüfkörpers und seiner Vorbereitung.

Als Prüfkörper kamen das verdrehte Garn, das entdrehte Garn oder die Einzelfaser in Frage. Um während des Handlings eine Vorschädigung der Fasern bei den historischen Proben auszuschließen, kam nur das verdrehte Garn in Frage. Die Prüfung von Einzelfasern kam nicht in Frage, weil die geringen Kräfte außerhalb des Messbereiches der verwendeten Kraftmessdose lagen.

- Entwicklung einer standardisierbaren Technik zum Einsatz der Prüfkörper in die Klemmbacken ohne Schädigung der Prüfkörper. Festlegen der dafür minimal benötigten Länge des Garns.

In Abb. 5.4 sind die beiden Klemmbacken der Zugprüfmaschine schematisch dargestellt. Ihre Höhe beträgt 2,1 mm. Die Garnlänge sollte möglichst gering gewählt werden, welches aber noch ein reproduzierbares Einsetzen zwischen die Klemmbacken ermöglicht. Durch das Ein-

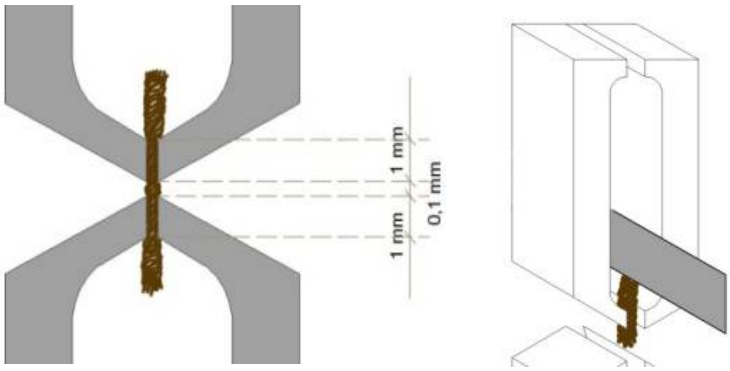


Abbildung 5.4: Klemmbacken der Zugprüfmaschine mit Maßen. Rechts: Einsetzen des Garnabschnitts mit Hilfe eines Stahllineals und dazu passenden Magetstreifens. Aus Bräunig *et al. 2016, S. 354.*

664 Bräunig 2012. Publiziert: Bräunig et al. 2016.
665 TAPPI T231 cm 07.

klemmen des Garnabschnittes zwischen ein Stahllineal und einen flexiblen, flachen Magnetstreifen war es möglich, ein 5 mm langen Garnabschnitt in die Klemmbacken der Maschine zu positionieren. Durch die pneumatische Regulierung des Druckes der Klemmbacken (6 bar), konnten die Garnabschnitte ohne Vorschädigung eingesetzt werden.[666]

Darüber hinaus wurden folgende Kriterien bei der Prüfung von Garnabschnitten evaluiert: Vermeiden des Rutschens der Proben aus den Klemmbacken während der Prüfung, vollständiges und gleichmäßiges Reißen aller beteiligten Fasern, Reproduzierbarkeit der Zugprüfung innerhalb eins akzeptierten Schwankungsbereiches.
Weil die Garne teilweise sehr unterschiedliche Dicken und Feinheiten aufwiesen, wurde aus der Höchstzugkraft F_H in cN die feinheitsbezogene Höchstzugkraft f_H in cN/tex bestimmt, um Garne unterschiedlicher Feinheit besser vergleichen zu können. Die Berechnung erfolgte nach Formel 5.14:[667]

$$f_H = \frac{F_H}{Tt} \tag{5.14}$$

Die Feinheit Tt in tex ist die Masse des Garns m bezogen auf die Garnlänge l von 100 m.[668]

$$Tt_v = \frac{m}{l} \tag{5.15}$$

Die Bestimmung der Feinheit der historischen Garnproben kann in Anlehnung an das Abschnittverfahren durchgeführt werden.[669] Es ist jedoch nicht möglich, die von der Textilprüfung vorgeschlagene Garnlänge und Vorspannkraft einzuhalten. Die Garnproben von 5 mm Länge wurden ohne Vorspannkraft zugeschnitten.
Es empfiehlt sich, auf die Vorspannkraft der eingespannten Proben vor der Durchführung der Zugprüfung zu verzichten. Es sollte nicht riskiert werden, dass einzelne Faserbündel der Garnabschnitte in der sehr geringen Einspannlänge schon vor Durchführung der Zugprüfung reißen. Die Vorspannkraft ist ohne Einfluss auf das Ergebnis der Höchstzugkraft, verändert jedoch durch die veränderte Vordehnung das Ergebnis der Längenänderung.[670] Auf die Auswertung der Längenänderung im Form einer Höchstzugkraftdehnung wurde daher verzichtet.
Aus dem Zusammenhang zwischen Einspannlänge und Prüfgeschwindigkeit aus NORM DIN EN ISO 2062 ergibt sich für die hier angewandte Einspannlänge von 0,1 mm eine Prüfgeschwindigkeit von 0,1 mm/min.

Die Vorversuche im Rahmen der Seminararbeit zeigten, dass die Methode in ihrer Anwendung an Garnabschnitten sinnvolle Ergebnisse hervorbringt und prinzipiell für historische Garnproben angewendet werden kann. Die in der Seminararbeit entwickelte Prüfvorschrift ist bei der

666 Bräunig et al. 2016, S. 354.
667 Thomas/Reumann 2000c, S. 274—275.
668 Thomas/Reumann 2000b, S. 251.
669 Thomas/Reumann 2000b, S. 257—258.
670 Reumann 2000e, S. 95.

Beschreibung der Durchführung der Versuche im experimentellen Teil angegeben.[671] Nach Abschluss aller Zugprüfungen ergab sich, dass Einzelheiten in der Durchführung für eine zukünftige Anwendung optimiert werden können.

5.3 Bestimmung der Gleichgewichtsfeuchte

Zur Erfassung der Gleichgewichtsfeuchte kann man zwischen direkten und indirekten Methoden unterscheiden. Direkte Messverfahren beruhen auf der Trennung von Wasser und dem Feststoff. Die Masse oder das Volumen des Wassers kann durch Verdampfen, Einfrieren, Destillieren oder chemische Verfahren erfasst werden. Bei den indirekten Messmethoden werden Substanzeigenschaften gemessen, die von der Materialfeuchte abhängig sind.[672] Ein direktes Verfahren ist die Erstellung von Sorptionsisothermen. Ein indirektes Verfahren ist die Nah-Infrarot-Spektroskopie.

5.3.1 Sorptionsisothermen

Sorptionsisothermen beschreiben den Gleichgewichtszustand eines Materials in ihrer jeweiligen Umgebungsfeuchte bei konstanter Temperatur. Weil die Sorption vom Aufbau eines Materials abhängt, werden sie auch eingesetzt, um Informationen über die dazu gehörige molekulare, supramolekulare und morphologische Struktur des Fasermaterials zu erhalten.[673]
Die Sorptionsisotherme wird erstellt, indem die Masseänderung des Faserstoffes bei stufenweiser Erhöhung (Absorptionsisotherme) oder Erniedrigung (Desorptionsisotherme) der Umgebungsfeuchte erfasst wird, bis der Gleichgewichtszustand erreicht ist. Die Differenz zwischen Ab- und Desorption kennzeichnet die Hysterese.

Durchführung

Zur Durchführung von Sorptionsisothermen existieren die Vorschriften DIN EN ISO 12571[674] und DIN 66138[675], die sich jedoch nicht speziell auf Faserstoffe beziehen. Sie können als Grundlage dienen, einige Besonderheiten sind jedoch zu berücksichtigen.

671 Kapitel 6.2.4 „Durchführung Nullzugfestigkeit an Garnabschnitten“ S. 238ff.
672 Kupfer 1997, S. 20.
673 Wyeth 2005.
674 NORM DIN EN ISO 12571.
675 NORM DIN 66138.

Die Menge der aufgenommenen Feuchte wird gravimetrisch ermittelt. Prinzipiell kann zwischen der statischen und dynamischen Methoden unterschieden werden. Bei der statischen Methode werden die Proben in Gefäße mit jeweils bekannter Masse gebracht, in eine Klimakammer gelegt und eine bestimmte relative Feuchte eingestellt. Zum Wiegen werden die Proben in den zuvor geschlossenen Gefäßen aus der Klimakammer entnommen. Die Gleichgewichtsfeuchte ist erreicht, wenn sich in der Probe eine Massekonstanz eingestellt hat, d. h. wenn die Änderung der Masse dreier aufeinanderfolgender Wägungen, die in mindestens 24 h Abstand durchgeführt wurden, weniger als 0,1 % der Gesamtmasse beträgt.[676]

Bei der dynamischen Methode handelt es sich um vollautomatische Messgeräte, in welchem die Probe von wenigen mg in zirkulierenden Luftströmen mit definierter Atmosphäre konditioniert wird, wodurch das Erreichen des Gleichgewichtszustandes gegenüber der statischen Methode beschleunigt wird. Die Messung der Massezunahme ist in das System integriert. Der entscheidende Vorteil ist ein vollautomatischer Ablauf mit programmierten Feuchtestufen, die den Messzyklus zeitlich optimieren. In der Regel sind diese Geräte mit sehr fein auflösenden Waagen ausgestattet, was eine geringe Probenmenge erlaubt. Gegenüber der statischen Methode werden Fehler, welche sich durch das Öffnen des klimatisierten Raumes zur Wägung der Proben entstehen, vermieden.

Prinzipiell beginnt der Erfassungsbereich der Sorptionsisothermen bei 0 %rF. Dafür werden die Proben nach den genannten Normen vor Beginn der Absorptionsisotherme vollständig getrocknet. Bei der dynamischen Methode zur Erstellung der Sorptionsisothermen kann die Probe im wasserfreien Stickstoffstrom getrocknet werden. Bei der Durchführung der statischen Methode steht diese Technik in der Regel nicht zur Verfügung. Hier ist die geeignetste Methode die Trocknung des Materials bei Raumtemperatur und 0 % rF, was durch entsprechende Trocknungsmittel erzeugt werden kann. Diese Methode wird jedoch kaum praktiziert, weil sie sehr viel Zeit in Anspruch nimmt. Das übliche Vorgehen ist daher das Trocknen der Faserstoffe bei erhöhter Temperatur, in der Regel bei 110 °C. Diese Variante birgt zwei Fehlerquellen in sich: die relative Feuchte im Ofen ist nicht gleich 0 %, sodass eine geringe Restfeuchte im Material verbleibt. Darüber hinaus werden durch die hohe Temperatur Begleitsubstanzen des Fasermaterials, wie Fette und Wachse entfernt, wodurch es zu einem irreversiblen Masseverlust kommt. Der dadurch entstehende Fehler in der Bestimmung des Feuchtezuschlags wird von Morton und Hearle mit 0,2 % eingeschätzt.[677]

Gegen das Trocknen des Fasermaterials vor der Erstellung der Sorptionsisotherme spricht der Nachweis an Baumwolle, dass sich die Wasseraufnahmefähigkeit reduziert wenn der Faserstoff zuvor hohen Temperaturen (z. B. 110 °C) unter Abwesenheit von Feuchte ausgesetzt war.[678] Es könnte zu Abweichungen in der Sorptionsisotherme führen. Eine detaillierte Diskussion zu der Frage, bis zu welcher Temperatur keine Veränderungen in der Struktur des Fasermaterials auf-

676 NORM DIN EN ISO 12571.
677 Morton/Hearle 1993, S. 162—163.
678 Urquhart 1960, S. 23. Siehe auch Kapitel 3.2.1 „Cellulose: Supramolekulare Ebene“ S. 51.

treten, sodass die Sorption gleichbleibend verläuft, ist nicht publiziert. Um Veränderungen bezüglich der Sorptionsfähigkeit der Textilien durch eine vorausgehende vollständige Trocknung bei hohen Temperaturen zu vermeiden, ist es abzuwägen, ob die Sorptionsisotherme bei höheren Feuchten begonnen wird und die Bestimmung der Trockenmasse für die Berechnung des Feuchtezuschlags im Anschluss erfolgt. Allerdings wird dann der untere Bereich bis zur ersten durchgeführten Stufe der relativen Feuchte nicht erfasst. In der vorliegenden Arbeit wird dieses Vorgehen gewählt. Die Faserproben werden bei 25 °C und 30 %rF konditioniert, die erste Massekonstanz wird dann bei 40 %rF erfasst, bei der die Aufzeichnung der Sorptionsisotherme beginnt.

Ab relativen Feuchten von 95 % und höher steigt die Sorptionsisotherme von Cellulose stark an. Da für diesen Bereich jedoch kein Messverfahren bekannt ist, mit dem mit hoher Genauigkeit die Luftfeuchte bestimmt werden kann, ist in diesem Bereich keine eindeutige Zuordnung der Gleichgewichtsfeuchte zur Luftfeuchte möglich. Hier beginnt der Kapillarwasserbereich, häufig auch überhygroskopischer Bereich genannt. Kapillarporöse hygroskopische Materialien können in diesem Bereich Wasser bis zur Wassersättigung aufnehmen.[679] Mit der relativen Feuchte von 95 % endet der Erfassungsbereich von Sorptionsisothermen. Der Kurvenbereich im überhygroskopischen Bereich muss mit Hilfe anderer Methoden erfasst werden.[680] In der Textiltechnik ist die Messung des Wasseraufnahme- und des Wasserrückhaltevermögens üblich.[681]

Die Genauigkeit der Sorptionsisotherme wird durch die Genauigkeit des eingestellten Klimas und durch die Genauigkeit der Waage bestimmt. Diese gibt auch die Größe der Proben vor, um in der geforderten Genauigkeit die Massekonstanz erfassen zu können. Für Faserproben aus einem historischen Bildträger eines Leinwandgemäldes kommt aufgrund der geringen Probemenge, die entnommen werden kann, nur die Anwendung der dynamischen Methode in Frage.

Auswertung und Interpretation der Sorptionsisothermen

Der Verlauf der Sorptionsisotherme erlaubt Rückschlüsse auf die Bindungsarten der Wassermoleküle und im Falle der gefüllten Poren, welche Porengrößen mit Wassermolekülen vollständig gefüllt sind.[682] Prinzipiell werden fünf Typen von Sorptionsisothermen unterschieden (s. Abb. 5.5).

679 Neue et al. 1997, S. 236.
680 Klopfer/Homann 2008, S. 364.
681 Reumann 2000a, S. 213—216 und S. 474.
682 Siehe Tabelle 3.3, S. 54.

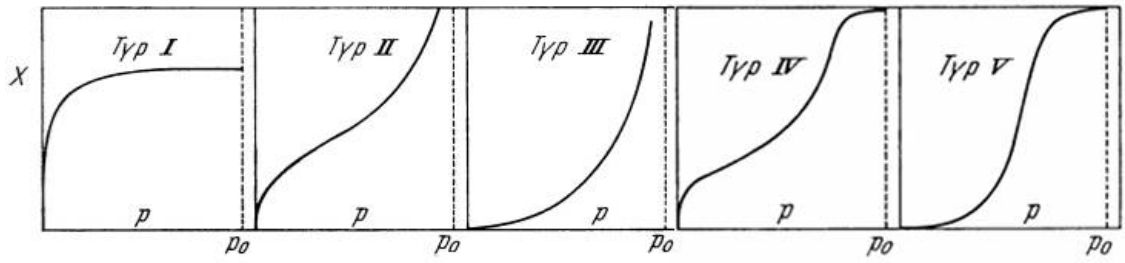


Abbildung 5.5: Fünf Typen von Sorptionsisothermen nach Urquhart 1960, S. 16.

Gal ordnet die Aufnahme von Wassermolekülen durch Cellulose zu einer Sorption mit Strukturänderung und begrenzter Quellung. Dies entspricht der Sorptionsisotherme vom Typ II. Zusätzlich kann auch Kapillarkondensation auftreten.[683] Cellulose kann also als hygroskopischer kapillarporöser Stoff betrachtet werden.

Eine mathematische Modellierung ermöglicht eine systhematische und vergleichende Auswertung der Isothermen und erweitert die Interpretationsmöglichkeit hinsichtlich der Frage, wie hoch die jeweiligen Anteile der mono- und multimolekularen Schichten von Wassermolekülen sind.

Ein grundlegender Ansatz, auf dem andere aufbauen, beinhaltet die Annahme, dass die Wasserdampfmoleküle nur in einer monomolekularen Schicht bis zur gleichmäßigen Bedeckung der Oberfläche angelagert und adsorbiert werden. Sie bilden einen fest gebundenen Monolayer. Diese Langmuir-Isotherme entspricht grafisch dem Typ I der in Abb. 5.5 dargestellten Sorptionsisothermen.[684] Dieser Ansatz wurde von Brunauer, Emmet und Teller erweitert, indem eine zweite Sorptionsstufe im Sinne einer Mehrschichtabsorption (Multilayer) hinzugenommen wurde. In diesem BET-Modell weist der Monolayer eine höhere Bindungsenergie auf als die darüber liegenden Schichten. Grafisch ausgedrückt entspricht es der in Abb. 5.5 dargestellten Isothermen des Tys II und III.[685] Es eignet sich auch, um die spezifische Oberfläche des Materials zu berechnen. Dies wäre für die Beurteilung von Hohlräumen und Poren der Faserstoffe sinnvoll, bei quellenden Materialien ist diese Berechnung jedoch fehlerbehaftet und nicht durchzuführen. Für stark polare Oberflächen ist sie ebenfalls ungeeignet.[686]

Aufbauend auf das BET-Modell entwickelten Guggenheimer, Anderson und De Boer die GAB-Isotherme. Sie beschreibt das Sorptionsverhalten über einen großen Sorptionsbereich von ca. 5 % bis 90 %rF. Das Modell geht gleichermaßen von Mono- und Multilayer aus und beschreibt eine Kurve des Typs II. Innerhalb des Multilayers besitzen die gebundenen Moleküle den gleichen energetischen Zustand, der zwischen dem des Monolayers und freiem Wasser liegt. Jene Wassermoleküle, die an die Wassermoleküle gebunden sind, die in Multilayern struk-

683 Gál 1967, S. 28.
684 Kast 1988, S. 23.
685 Kast 1988, S. 29.
686 NORM DIN 66138, S. 9.

turiert sind, ähneln in ihrem energetischen Zustand immer mehr dem freien Wasser.[687] Das GAB-Modell wird häufig in der Lebensmittelforschung angewandt und dort als universelles Sorptionsmodell empfohlen.[688] Es wurde erfolgreich für die Beschreibung von Sorptionsisothermen von Holz in der Konservierungswissenschaft angewandt und erscheint für die hier durchgeführten Sorptionsisothermen als ein passendes Modell.[689] Die GAB-Gleichung setzt drei Annahmen voraus: die im Material zur Verfügung stehenden Bindungsstellen für die Wassermoleküle sind identisch und voneinander unabhängig, es herrschen isotherme Verhältnisse und das Material ist zugänglich für die Wasserdampfmoleküle. Die GAB-Gleichung lautet:

$$X(rF)=\frac{X_m \cdot C_g \cdot K \cdot rF}{(1-K \cdot rF)\cdot(1-K \cdot rF+C_g \cdot K \cdot rF)} \tag{5.16}$$

X = Feuchtebeladung [g H_2O/g TM]
rF = relative Feuchte

X_m, C_g (>0) und K ($0 < K \leq 1$) sind die GAB-Energiekonstanten, die die Wechselwirkung zwischen den Wassermolekülen mit dem jeweiligen Material charakterisieren, an dem sie gebunden sind. Dabei steht X_m für die Bindung der Feuchte im Monolayer. Die Konstante C_g beschreibt das Verhältnis zwischen der Bindungsstärke der Wassermoleküle im Mono- und im Multilayer. Je größer C_g ist, desto stärker ist die Bindung der Wassermoleküle im Monolayer und desto größer ist der Unterschied der Bindungsstärke zwischen Mono- und Multilayer.
Das Verhältnis der Bindungsstärken zwischen Multilayer und darüber liegendem freien Wasser wird durch die Konstante K ausgedrückt. Hat K den Wert 1, besteht nahezu kein Unterschied zwischen den Wassermolekülen im Multilayer und dem freien Wasser, was bedeutet, dass die dem Monolayer folgenden Schichten nicht in der Form von Multilayern angeordnet sind, sondern eher dem freien Wasser gleichen. Je mehr Wassermoleküle in Multilayern strukturiert sind, desto geringer ist der Wert für K. Aus der Art der Bindungsmöglichkeiten der Wassermoleküle ergeben sich die in Tabelle 5.5 dargestellten Werte für die GAB-Konstanten. K bestimmt das Profil der Sorptionsisotherme im Bereich höherer relativer Feuchten und C_g bestimmt die Ausbildung des ersten Knies im unteren Drittel der Sorptionsisotherme. Dieser Bereich beschreibt den Übergang von Monolayer- in die Multilayeradsorbatschicht.[690]

Die mathematische Darstellung der Isotherme ermöglicht eine Erfassung des quantitativen Anteils der Wassermoleküle die im Monolayer gebunden sind. Die Grenzen zwischen den Arten, wie die Wassermoleküle in der Flachsfaser gebunden sind, sind jedoch fließend und eine exakte Einteilung und Abgrenzung entspricht nicht den realen Verhältnissen. Bei der Interpretation der mathematischen Modellierung ist zu berücksichtigen, dass es sich um ein mathema-

687 Quirijns et al. 2005, S. 1806.
688 Timmermann et al. 2001.
689 Bratasz et al. 2012.
690 Quirijns et al. 2005, S. 1806—1807.

tisches Modell handelt, was eine Annäherung ermöglicht um eine gewisse Vergleichbarkeit der Isothermen herzustellen.

Tabelle 5.5: Werte der GAB-Konstanten C_g und K mit korrespondierenden Bindungsarten der Wassermoleküle Quirijns *et al. 2005, S. 1807.*
≈ ungefähr gleich ≠ ungleich

Mono ≈ Multi ≈ freies Wasser	**Mono ≈ Multi ≠ freies Wasser**	**Mono ≠ Multi ≠ freies Wasser**	**Mono ≠ Multi ≈ freies Wasser**
$C_g \approx 1$	$C_g \approx 1$	$C_g \gg 1$	$C_g \gg 1$
$K \approx 1$	$K \ll 1$	$K \ll 1$	$K \approx 1$

5.3.2 Nah-Infrarot-Spektroskopie

Mit Hilfe der oben beschriebenen Erstellung von Sorptionsisothermen ist es möglich, Daten über das Sorptions- und Desorptionsverhalten verschiedener Gewebe zu erfassen. Diese sensible Methode ist ein wichtiges Instrument für die Grundlagenforschung in der Konservierungswissenschaft, jedoch erfordert sie einen gewissen zeitlichen und finanziellen Aufwand und ist mit einer, wenn auch kleinen, Probenentnahme verbunden. Für die zerstörungsfreie Erfassung der Materialfeuchte in situ am Bildträger steht bisher kein Instrument zur Verfügung. Bisher wurden Beobachtungen zum hygrischen Verhalten textiler Bildträger, sowohl während eines experimentellen Aufbaus als auch im Rahmen von Konservierungs- oder Restaurierungsmaßnahmen am originalen Bildträger, in Bezug zu der umgebenden Luftfeuchte gesetzt. Präzisere Interpretationsmöglichkeiten sind jedoch möglich, wenn nicht die Luftfeuchte, sondern die für jedes Material individuelle Materialfeuchte für die Deutung des Verhaltens herangezogen werden könnte. Darüber hinaus wären Konservierungsmaßnahmen, die mit einem Feuchteeintrag einhergehen, kontrollierter und gezielter einsetzbar, wenn die Materialfeuchte in situ erfasst werden könnte. Mit der Nah-Infrarot-Spektroskopie (NIRS) steht eine Technologie zur Verfügung, deren Einsatz die Umsetzung dieser Zielstellung verspricht.[691]
In der Spektroskopie des nahen Infrarotbereichs werden eine Vielzahl von Kombinations- und Oberschwingungen im Bereich zwischen 800 und 2500 nm betrachtet. Da dies hauptsächlich Schwingungen von CH-, OH- und CO-Gruppen sind, eignet sich die Methode besonders gut für die Charakterisierung organischer Materialien. Dieses und die Tatsache, dass es sich um eine zerstörungsfreie Messtechnik handelt, macht sie besonders attraktiv für den Einsatz im Bereich der Kunst- und Kulturgüter. Durch die Entwicklung verschiedener relativ handlich einsatzbereiter Geräte ist es möglich, die Materialien in situ zu vermessen, also die Spektren direkt am Leinwandgemälde aufzunehmen. Abhängig von der Bauart der NIR-Spektrometer werden für die eigentliche Messung von einigen Millisekunden bis zu einer Minute benötigt.

691 von Reden et al. 2015.

Für Papier hat sich ein Verfahren etabliert, um von NIR-Spektren unbekannter Proben auf bestimmte Charakteristika des Materials wie pH-Wert oder Bruchkraft zu schließen.[692] Solch eine Analyse basiert auf statistischen Methoden, die anhand von Daten und Spektren eines Referenzprobensatzes angelernt bzw. erstellt wurden. Für diese Korrelation ist es nötig, eine statistisch repräsentative Menge an Referenzproben zerstörend zu analysieren (z. B. pH-Wert Messungen und Bruchkraftprüfung) sowie deren NIR-Spektren zu messen. Ähnliche Ansätze wurden bereits für Textilien und Bildträger von Leinwandgemälden verfolgt.[693] Die Datenlage reicht hier jedoch noch nicht aus, um aus den aufgezeichneten Spektren entsprechende Informationen ableiten zu können.

Die Nah-Infrarot Spektroskopie bietet sich für die Erfassung der Materialfeuchte von Geweben an, weil Wasser im NIR-Spektrum zwei deutliche Banden in den Bereichen um 1452 nm und 1927 nm aufweist. Während sich im Bereich um 1452 nm die Banden von Wasser und Flachs überlagern, wird der Bereich um 1927 nm nur wenig von den Geweben beeinflusst (Abb. 5.6). Die Idee zur Erfassung der Materialfeuchte an Geweben wurde bereits von Wyeth und Garside et al. vorgeschlagen.[694]

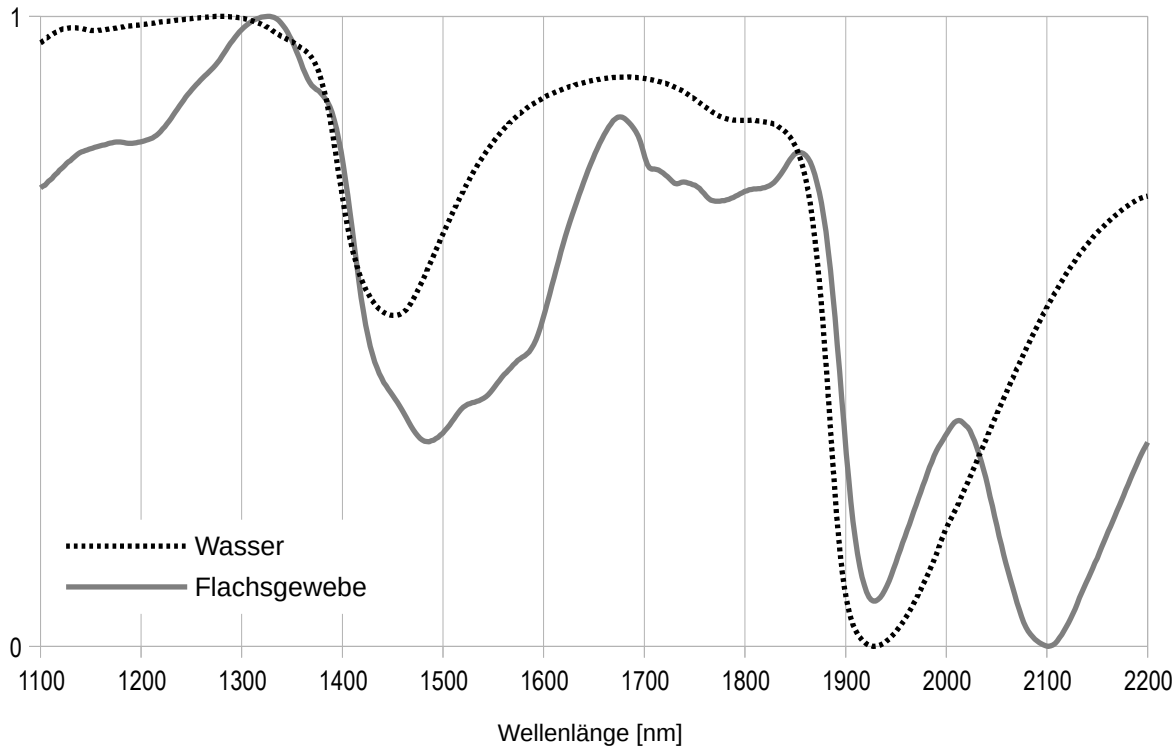


Abbildung 5.6: NIR-Spektrum (normiert) eines Flachsgewebes und von Wasser. Aus: von Reden et al. 2015, S. 142.

692 Rohde/Lichtblau 2013 und Lichtblau et al. 2009.
693 Garside/Richardson 2008 und Oriola et al. 2011.
694 Wyeth 2005 und Garside et al. 2005.

Um aus der hohen Informationsdichte von mehreren hundert Datenpunkten pro Spektrum die relevanten Informationen zu extrahieren, bedient man sich der Chemometrik. Für qualitative Datenanalysen hat sich vor allem die Principal Component Analysis (PCA) und für quantitative Auswertungen die Partial Least Squares Methode (PLS) bewährt. Wurde anhand der bekannten Daten und Spektren erst einmal eine chemometrische Methode entwickelt und etabliert, ist es möglich, diese Daten aus dem Spektrum einer unbekannten Probe zu bestimmen, solange diese Probe weitestgehend denen der verwendeten Referenzproben entspricht.[695]
Es bietet sich an, die Anwendbarkeit der NIR-Spektroskopie im Rahmen dieser Arbeit für die in situ Messung der Materialfeuchte zu überprüfen. Eine entsprechende Vorgehensweise wurde im experimentellen Teil entwickelt.

5.4 Weiterführende Methoden

Für die restauratorische Praxis ist es relevant, welche Auswirkungen eine Änderung der Materialfeuchte auf das Dimensionsverhalten der Fasern, des Garnes und des Gewebes hat.
Um die Dimensionsänderung der Faser durch verschiedene Umgebungsfeuchten zu erfassen, wurden verschiedene Vorgehensweisen entwickelt. Diese basieren auf dem Prinzip, die Veränderungen mit Hilfe einer kleinen Atmosphärenkammer lichtmikroskopisch zu messen.[696] Schon relativ früh wurden jedoch die Nachteile dieser Methode diskutiert.[697] Dies ist wohl der Grund, warum die wenigen, bisher publizierten Daten zum Ausmaß der Breiten- und Längenänderung der Fasern, an Fasern durchgeführt wurden, die komplett in flüssigem Wasser getränkt wurden. Dadurch werden insgesamt höhere Quellungswerte erzeugt als es durch die Aufnahme von Wasserdampf der Fall wäre.[698]
Aus heutiger Sicht fehlt vor allem eine Methode, die Dimensionsänderungen bei definierten Umgebungsfeuchten erfassen zu können. Dies scheint der Grund zu sein, warum bisher diesbezüglich keine Daten publiziert wurden. Ideal wäre neben dem Zusammenhang zwischen Umgebungsfeuchte und Materialverhalten auch ein zeitgleicher Bezug zwischen Änderung der Umgebungsfeuchte und Reaktionen des Bildträgers. Im Rahmen dieser Arbeit bestand die Möglichkeit, mit Hilfe von strahlendiagnostischen Methoden, visuelle Beobachtung des Quellens und Schwindens an Proben des textilen Bildträgers durchzuführen. Im Folgenden werden zwei verschiedene Methoden vorgestellt, wie dies mit Röntgenstrahlen umgesetzt werden kann.

695 Lichtblau et al. 2009.
696 Sommer 1960, S. 1200—1203.
697 Preston 1946.
698 Vergleiche auch Kapitel 3, S. 56.

5.4.1 Variable Pressure-Rasterelektronenmikroskopie

Das variable-pressure Rasterelektronenmikroskop (VP-REM) ist eine spezielle Variante des Rasterelektronenmikroskopes (REM). Durch das Einleiten bestimmter Gase, z. B. Stickstoff oder Luft aber auch Wasserdampf in die Probenkammer, herrschen im Gegensatz zum REM, welches mit Hochvakuum arbeitet, in der Probenkammer niedrige Drücke bis zu 2660 Pa. Beim Einsatz von Wasserdampf kann man über die Variation von Druck und Temperatur die relative Luftfeuchte zwischen 0 und 100 % regulieren. Durch das Absenken der Temperatur kann auch eine Kondensation herbeigeführt werden. Das VP-REM erlaubt die Untersuchung von nichtleitenden Proben, wodurch die im REM sonst übliche vorherige Beschichtung der Proben überflüssig wird. Die Materialfeuchte der untersuchten Materialien kann unverändert bleiben (im Hochvakuum würden sie trocknen) bzw. gezielt variiert werden, wodurch die in situ Beobachtung von Sorptions- und Desorptionsvorgängen ermöglicht wird.[699] Ein solches Vorgehen ist bereits an anderen Fasern erprobt worden.[700]

Die Anwendung des VP-REM wurde in der Konservierungswissenschaft von Davis für die Untersuchung von Archäologischem Nassholz und von Haller für die Untersuchung von Textilfasern vorgeschlagen.[701]

Die von Haller vorgestellten Ansätze zur Untersuchung des textilen Bildträgers stellen ein wegweisendes Konzept zur Untersuchung von Quell- und Schwundbewegungen des textilen Bildträgers im mikroskopischen bzw. submikroskopischen Bereich dar. Sie zeigt, dass aufgrund der Größe der Probenkammer, neben der Beobachtung einzelner Fasern, Garne oder Ausschnitten von Geweben auch kleinere Gemälde oder Modelle untersucht werden können. Methodisch stellt das einen bedeutenden Vorteil dar, weil alle Größendimensionen des Bildträgers von der Einzelfaser bis zum fertigen Gemälde unter identischen Bedingungen untersucht werden können. Das von ihr verwendete Gerät im Labor für Archäometrie und Konservierungswissenschaften an der Akademie der Bildenden Künste Stuttgart stand auch für Versuche im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung.

Es wurden verschiedene technische Fasern, Garne und Gewebe der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Gewebe untersucht. Dabei stand zunächst die Anwendung der Methode im Vordergrund.

Eine Möglichkeit, die Dimensionsänderungen einer Elementarfaser zu erfassen, ist die Messung der Breite der Elementarfaser bei variierender Umgebungsfeuchte. Anhand von historischem Fasermaterial der Wandbespannung aus dem Herrenhaus Ermlitz (H-18-E1) soll dies gezeigt werden.[702] Die rF wurde mehrfach hintereinaner zwischen 40 % und 91 % gewechselt. Bei jeder Feuchtestufe wurde ein Bild der Fasern aufgenommen. Anhand dieser Bilder wurde

699 Stokes 2008, S. 64—65 und S. 81—90.
700 Karlsson et al. 1989.
701 Davis 2003 und Haller 2007.
702 Eine detailliertere Charakterisierung dieses Probenmaterials wird in Kapitel 6.1.4 „Historische Gewebeproben“ S. 214 gegeben.

die jeweilige Faserbreite an zwei Positionen in einer Bildbearbeitungssoftware gemessen. Das Ergebniss ist in Abbildung 5.7 zusammengefasst, exemplarisch sind in Abbildung 5.8 (S. 199) beide gemessenen Fasern im trockenen und im gequollenen Zustand zu sehen.

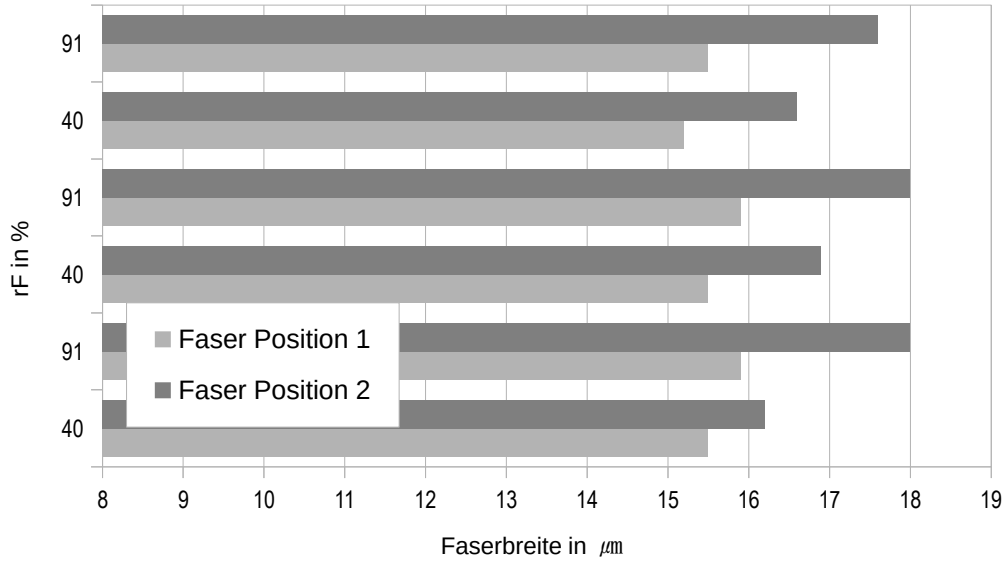


Abbildung 5.7: Breite einer historischen Flachsfaser der Wandbespannung Ermlitz (H-18-E1) in Abhängigkeit der relativen Feuchte im VP-REM.

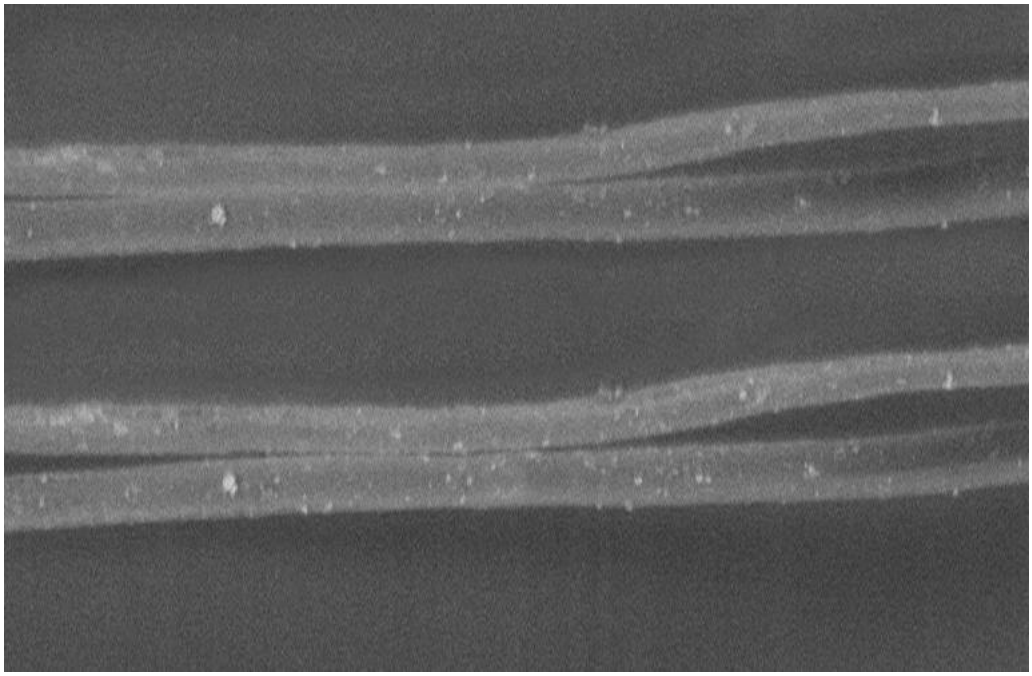


Abbildung 5.8: Breitenquellung der historischen Flachsfaser der Wandbespannung Ermlitz (H-18-E1) im VP-REM.

Unten 40 % rF, oben 91 % rF, Bildbreite entspricht 252 µm.

Das Quell- und Schwundverhalten der Fasern kann sehr gut beobachtet werden, eine präzise Auswertung der Dimensionsänderung ist auf diesem Weg prinzipiell möglich. Auch das Vermessen von Querschnittsflächen ist möglich, wie die Abbildungen von HALLER zeigen.[703] Besonders interessant erscheint die Möglichkeit, auf mikroskopischer Ebene den Kondensationspunkt des Wassers am Material beobachten zu können. Hinsichtlich der Frage zum Unterschied der Reaktionen des Gewebes zwischen Wasserdampf und flüssigem Wasser könnten Untersuchungen gemacht werden. Auch Reaktionsgeschwindigkeiten könnten ausgewertet werden.

Weder HALLER und DAVIS, noch im Rahmen der hier durchgeführten Versuche wurde untersucht, in wie weit die im VP-REM herrschenden Drücke Einfluss auf die Sorption und Desorption der Faserstoffe nehmen und dadurch die Materialfeuchte des jeweiligen Materials von den Normalbedingungen abweicht. Der Atmosphärendruck auf Meereshöhe entspricht 101 325 Pa, also sehr viel höher als der Druck im VP-REM.
KOWALEWSKY beobachtet an Wolle, dass die Feuchteaufnahme vom Luftdruck abhängt. Die Feuchteaufnahme der Wolle ist höher, wenn der Luftdruck fällt, bei gleichbleibender rF. Der maximal gemessene Unterschied aufgrund von Luftdruckschwankungen betrug 0,5 %.[704]
SCHAPOSCHNIKOFF stellt jedoch an Bastfasern, u. a. auch Flachs, gegenteiliges fest. Nach seinen Messungen erhöht sich die Feuchte der Fasern bei steigendem Luftdruck unter Gleichbleiben der anderen Bedingungen.[705] BOBETH und MALLY greifen die Ergebnisse beider Autoren auf und verallgemeinern die Erkenntnis auf diverse Faserstoffe.[706]
Für weiterführende Experimente sollte dieser Aspekt jedoch vertiefend geklärt werden. Je nach eingestellter Temperatur (die Möglichkeit besteht zwischen -30 °C und +30 °C) gilt es auch den Einfluss der Temperatur auf die Sorption zu berücksichtigen. Auf diesen Zusammenhang wurde bereits hingewiesen.[707]
Um eine ergebnisorientierte Serienuntersuchung durchzuführen, müssen noch Standards definiert werden, die auf die Beobachtung von textilen Bildträgern abgestimmt sind. Dazu gehört die Probenhalterung, bzw. -montierung, die Bedingungen, die im VP-REM herrschen und Dokumentation der Ergebnisse. Weil die Erarbeitung dieser Standards über das Maß der im Rahmen dieser Arbeit zur Verfügung stehenden zeitlichen Kapazitäten hinaus geht, kam es nicht zu einer Anwendung des VP-REM im experimentellen Teil dieser Arbeit. Sowohl die Vorarbeiten von HALLER als auch die hier vorgestellten Beispiele zeigen, dass es sich jedoch um eine vielversprechende Technik handelt, um Dimensionsänderungen in Folge von Sorption und Desorption in situ zu beobachten. Es ist wünschenswert diesen Ansatz weiter zu vertiefen und diese Technik für die genannten Fragestellungen einzusetzen.

703 HALLER 2007, S. 24.
704 KOWALEWSKY 1929.
705 SCHAPOSCHNIKOFF 1928, S. 849.
706 BOBETH 1993, S. 234 und MALLY 1995, S. 214.
707 Siehe Kapitel 3, S. 40f.

5.4.2 Nano-Computertomographie

Die zweite bildgebende Methode, die im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch eingesetzt wurde, ist die Nano-Computertomographie (Nano-CT). Die Durchführung wurde freundlicherweise vom Fraunhofer-Institut für Keramische Technologien und Systeme (IKTS) in Dresden vorgenommen. Die Fragestellung zielt, wie auch der Einsatz des VP-REM, auf die Beobachtung von Dimensionsänderungen aufgrund von Quellen und Schwinden. Dabei ist die Bildgebung, im Gegensatz zum VP-REM, in die dritte Dimension erweitert, was zusätzliche Interpretationsmöglichkeiten eröffnet. Jedoch ist im Gegensatz zum VP-REM die mögliche Probengröße auf die Betrachtung von einzelnen oder wenigen Elementarfasern beschränkt.
Das Gerät wurde gewählt, weil es prinzipiell die Möglichkeit bietet, eine Atmosphärenkammer zu integrieren, in der die Temperatur und die rF reguliert werden kann. Dadurch ist die Option gegeben, die Auswirkungen des Quellen und Schwinden am Fasermaterial zu studieren. Im Gegensatz zum VP-REM herrschen in dieser Atmosphärenkammer keine gravierenden Unterschiede zu normalen Umgebungsbedingungen. Die Atmosphärenkammer konnte im Rahmen der hier durchgeführten ersten Aufnahme noch nicht zum Einsatz kommen. Im Vordergrund stand das Erstellen einer ersten Aufnahme einer Flachsfaser, um zu ermessen, wie detailliert die Wiedergabe und Abbildung der feinen Strukturen ist. Die Aufnahme von Flachsfasern durch Computertomographie wurde bereits erfolgreich durchgeführt.[708] Die Anwendung in der Konservierungswissenschaft für den beschriebenen Zweck ist jedoch neuartig. Daher kann nicht auf Vergleichsuntersuchungen oder Vorarbeiten aufgebaut werden.
Es wurde eine Aufnahme von einer neuen Flachsfaser aufgezeichnet. Es handelt sich um eine Probe aus dem im experimentellen Teil beschriebenen Gewebe N1.[709] Das Ergebnis ist in den Abbildungen 5.9 und 5.10 zu sehen. Die Wiedergabe ist ausreichend in der Auflösung für das Vermessen der Faser. Dies ist sowohl am Querschnitt als auch in der Längsansicht möglich. Die hier abgebildete Wiedergabe ist eine zweidimensionale Ansicht, der ursprünglich dreidimensional vorliegenden Daten. Durch die Dreidimensionalität ist die Auswertungsmöglichkeit

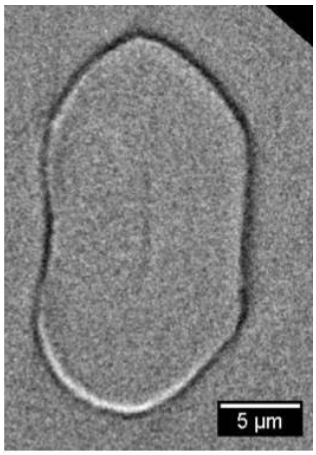


Abbildung 5.9: Querschnitt einer neuen Flachsfaser (N1) im Nano-CT, Aufnahme: IKTS Dresden.

708 Abbey et al. 2010 und Malek et al. 2016.
709 Eine detailliertere Beschreibung wird in Kapitel 6.1.1, S. 203 gegeben.

im Vergleich zum VP-REM insofern erweitert, dass der Querschnitt einer Einzelfaser entlang der Längsachse an unterschiedlichen Stellen gemessen werden kann. Dadurch erhöht sich die Anzahl der erfassten Daten an einer Faser.
Prinzipiell steht die Technik der Computertomographie in noch höheren Auflösungen zur Verfügung. Interessant wäre zu überprüfen, ob man visuell erfassen kann, wo die Wasserdampfmoleküle innerhalb der Flachsfaser angelagert werden. Das setzt voraus, dass die Wasserdampfmoleküle mit der Computertomographie optisch von der Flachsfaser zu unterscheiden sind. Dafür müssten Versuche folgen, die den Einsatz der Atmosphärenkammer beinhalten. Wenn das gelänge, stünde eine vielversprechende Technik zur Verfügung, um die unterschiedlichen Anlagerung von Wasserdampfmolekülen an z. B. unterschiedlich gealterten Flachsfasern zu visualisieren.

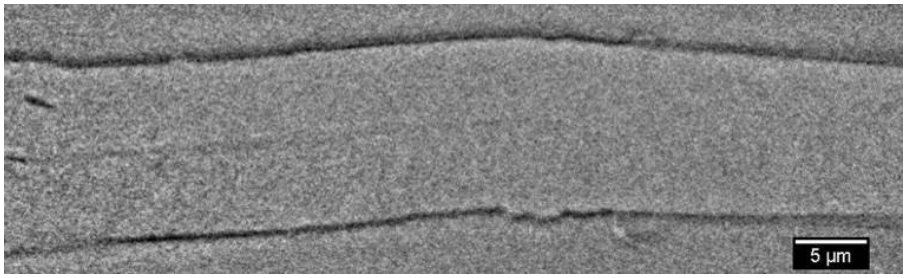


Abbildung 5.10: Längsansicht einer neuen Flachsfaser (N1) im Nano-CT, Aufnahme: IKTS Dresden.

6 Durchführung der Experimente

6.1 Verwendete Gewebe

Von den im Folgenden beschriebenen Geweben wurden zur Charakterisierung Gewebestrukturanalysen durchgeführt, deren Ergebnisse unter 6.1.6 zusammengefasst sind.

6.1.1 Neue Gewebe

Das neue Flachsgewebe, welches in verschiedenen Varianten künstlich gealtert wurde, wurde von der Holstein Flachs GmbH in Mielsdorf bezogen (Artikel Nr. 1163 roh). Der Flachsanbau erfolgte in ökologischem Landbau in Schleswig-Holstein. Nach der Ernte wurden die Pflanzenstängel auf dem Feld der Tauröste unterzogen. Es erfolgte eine rein mechanische Trennung von Langfasern, Kurzfasern (Werg) und Holzteilen (Schäben) auf einer Schwinganlage. Die Langfasern wurden zu Hechelband und Hechelwerg verarbeitet. Das Hechelband wurde zu feinen Garnen versponnen, das Hechelwerg wurde mit gereinigtem Schwungwerg im Verhältnis ca. 1:1 vermischt. Das Hechel- und Schwungwerg wurde mit Karden zum Band verarbeitet, gekämmt, doubliert und verstreckt und mit Flyer zum Vorgarn verdreht. Das Vorgarn wurde im Kochapparat mit Natriumhydroxid und Seife vorgarngekocht. Im nassen Zustand (durch Wasserbad ca. 40 °C) wurde es zu Nm 8,5 versponnen. Das Garn wurde getrocknet und zu Nm 8,5/2 verzwirnt.[710] Das Gewebe ist roh, lediglich der Kettfaden ist mit Stärke geschlichtet.[711] Das neue Gewebe trägt in den hier vorgestellten Versuchen das Probenkürzel N1.
Das Gewebe wurde vor der Durchführung der Experimente in 40 °C warmen Leitungswasser gewaschen. Dadurch sollten Verunreinigungen und vor allem die Stärke in den Kettfäden reduziert werden. Das Gewebe ist gewaschen und ungewaschen in Abb. 6.1 (S. 204) dargestellt.
Vier weitere neue Flachsgewebe, die jeweils gebleicht wurden, tragen die Probenkürzel N2, N3, N4 und N5. Sie wurden von Studierenden der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart zur Verfügung gestellt. Weitere Details werden in Abschnitt 6.1.3 (S. 207) über die gebleichten Gewebe gegeben.

710 Definition Nm siehe Anhang A.1, S. 299.
711 Vollständige Angaben des Herstellers siehe Anhang B.1.1, S. 300.



Abbildung 6.1: Neues Flachsgewebe N1. Links wie gekauft, rechts gewaschen. Horizontal Kette, vertikal Schuss.

Die Breite der Bildausschnitte entsprechen jeweils ca. 17 mm.

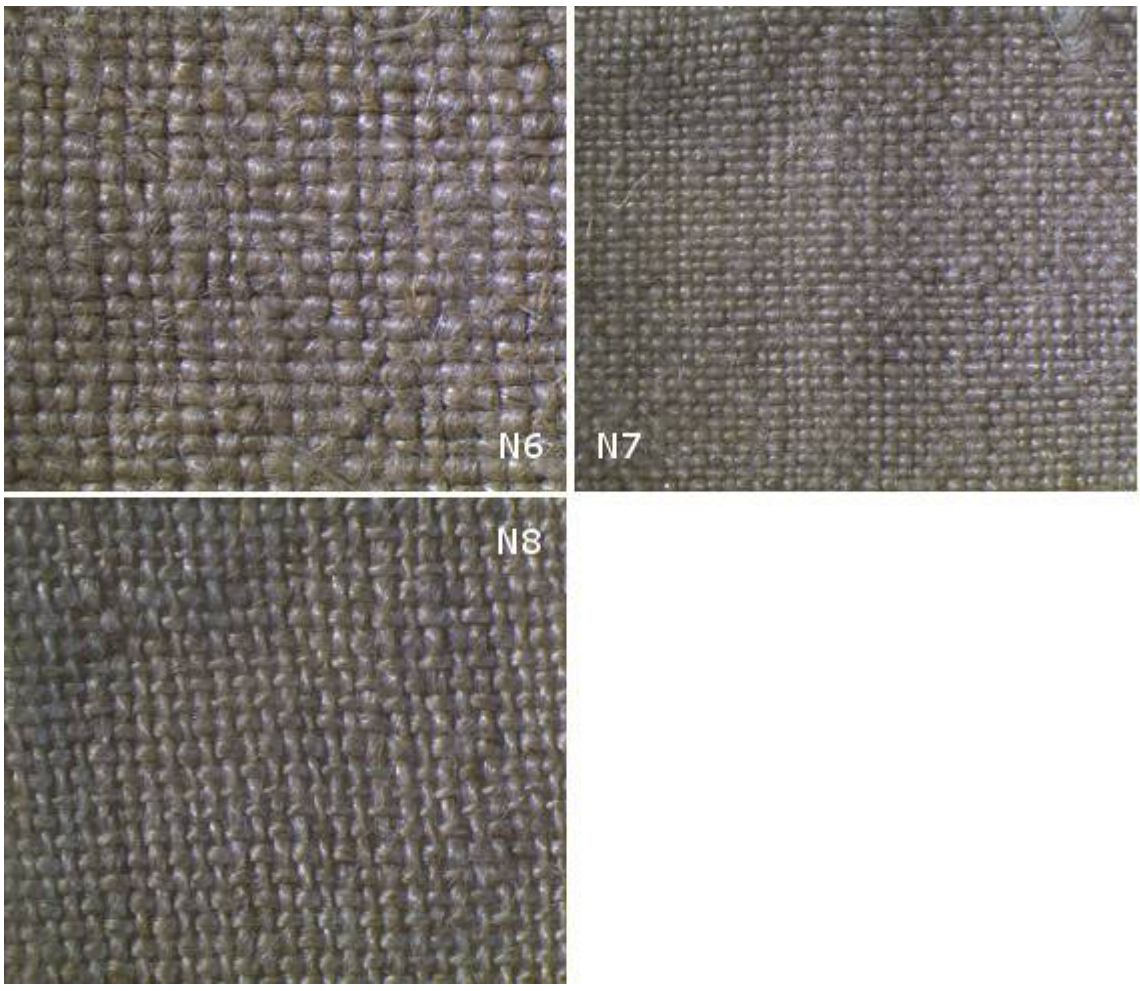


Abbildung 6.2: Neue Flachsgewebe N6, N7 und N8.

Die Breite der Bildausschnitte entsprechen jeweils ca. 15 mm.

Drei neue Flachsgewebe mit den Probenkürzeln N6, N7 und N8 wurden nicht weiter modifiziert und wurden für die Experimente mittels Nah-Infrarotspektroskopie verwendet. Es handelt sich um Gewebe, die im Fachhandel der Konservierungs- und Restaurierungstechnik vertrieben werden. Über Herkunft, Anbau und Verarbeitung der Flachspflanzen und der Herstellung von Garn und Gewebe lagen keine Informationen vor. Ihre Angaben sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst. Sie wurden vor der Durchführung der Experimente in 40 °C warmen Leitungswasser gewaschen.

Tabelle 6.1: Herstellerangaben der neuen Flachsgewebe.

Probenkürzel	Vertreiber	Beschreibung /Produktnummer
N1	Holstein Flachs GmbH, Mielsdorf	Artikel Nr. 1163, roh
N2, N3, N4, N5	Firma Sironi	ubk.
N6	Deffner & Johann, Röthlein	Belgisches Leinen, Artikel 2820010
N7	Kremer Pigmente, Aichstetten	Doublierleinwand L517, Artikel 873050
N8	Kremer Pigmente, Aichstetten	Doublierleinwand L518, Artikel 873060

6.1.2 Künstliche Alterung

Das unter 6.1.1 beschriebene Flachsgewebe N1 wurde künstlich gealtert. Die künstliche Alterung erfolgte in zwei voneinander getrennten Abläufen: eine Belichtung und eine daran anschließende klimatische Alterung durch erhöhte Temperatur und zyklisch wechselnder Umgebungsfeuchte. Die durchgeführten Kombinationen und die entsprechenden Probenbezeichnungen sind in Tabelle 6.2 (S. 206) zusammengefasst.

Belichtung

Für die Belichtung wurden zwei unterschiedliche Methoden angewandt: Belichtung durch Tageslicht hinter Fensterglas und die Belichtung durch eine Xenonbogenlampe.

Tageslicht

Für die Belichtung durch Tageslicht wurden die Gewebeproben hinter das Fensterglas eines nach Süden ausgerichteten Fensters der HfBK Dresden gehängt. Sie blieben dort für 10 Wochen in den Monaten November bis Januar. Die durch Tageslicht belichteten Gewebe tragen das Kürzel TL.

Tabelle 6.2: Übersicht der durchgeführten künstlichen Alterung von Gewebe N1 mit zugehörigen Probenbezeichnungen.

Probenkennung	Vorbehandlung	Belichtung		Klimaschrank	
		Dauer	Art	Dauer	Art
N1	gewaschen	-	-	-	-
N1-A-K4-u	gewaschen	-	-	4 Wochen	nicht gespannt
N1-A-K4-g	gewaschen	-	-	4 Wochen	gespannt
N1-A-K10-u	gewaschen	-	-	10 Wochen	nicht gespannt
N1-A-K10-g	gewaschen	-	-	10 Wochen	gespannt
N1-A-TL	gewaschen	10 Wochen	Tageslicht	-	-
N1-A-X84	gewaschen	84 Stunden	Xenonbogenlampe	-	-
N1-A-X168	gewaschen	168 Stunden	Xenonbogenlampe	-	-
N1-A-TL-K4-u	gewaschen	10 Wochen	Tageslicht	4 Wochen	nicht gespannt
N1-A-X84-K4-u	gewaschen	84 Stunden	Xenonbogenlampe	4 Wochen	nicht gespannt
N1-A-X168-K4-u	gewaschen	168 Stunden	Xenonbogenlampe	4 Wochen	nicht gespannt
N1-A-K105-u	gewaschen			4 Tage	105 °C, 0 %rF
Legende	N	Neues Gewebe			
	A	Künstliche Alterung			
	K	Klimaschrank			
	u	ungespannt			
	g	gespannt			
	TL	Tageslicht			
	X	Xenonbogenlampe			

Xeononbogenlampe

Die Belichtung durch eine Xeononbogenlampe erfolgte im Xenotest®. Die Bestrahlungsstärke betrug 42 W/m^2. Alle Wellenlängen unterhalb 320 nm wurden durch den Filter Suprax Xenochrome 320 gefiltert.[712] Die Umgebungsbedingungen im Probenraum betrugen 30 %rF und 35 °C.

Der Xenotest® der für die Versuche zur Verfügung stand, erlaubte eine zu belichtende Gewebegröße von 45 x 110 mm mit einseitiger Belichtung. Eine gleichmäßige Bestrahlung ergibt sich durch die rotierenden Bewegungen der Proben um die Bogenlampe herum. Insgesamt wurden sechzehn Gewebestücke belichtet. Ein Teil der Proben wurde einseitig für 84 Stunden

712 Das Spektrum der Lichtquelle ist im Anhang B.1.2, S. 301f wiedergegeben.

(Probenbezeichnung X84) ein anderer Teil beidseitig für 168 Stunden, d. h. jede Gewebeseite jeweils 84 Stunden (Probenbezeichnung X168) belichtet.
Die Dokumentation der tatsächlichen Lichteinstrahlung für beide Belichtungsarten wurde über blaue Lichtechtheitstypen aus Wolle gegeben. Dabei wurden die Stoffe der Stufen 1—8 belichtet.[713]
Tageslicht hat eine deutliche Verfärbung bei den Stoffen 1—3 verursacht. X84 hat eine deutliche Verfärbung bei den Stoffen 1—5 und eine leichte Verfärbung bei 6 verursacht. X168 hat eine deutliche Verfärbung bei den Stoffen 1—6 und eine leichte bei 7 verursacht.

Klimatische Alterung

Belichtete sowie nicht belichtete Gewebestücke wurden im Klimaschrank Vötsch VC0034 einer erhöhten Temperatur und zyklisch schwankender relativer Feuchte ausgesetzt. Dabei betrug die programmierte Temperatur konstant 70 °C. Messungen mit einem externen Gerät erbrachten Temperaturen zwischen 70,0 und 71,5 °C.[714] Die programmierte Umgebungsfeuchte wechselte jeweils für 12 Stunden von 30 %rF auf 80 %rF. Das Erreichen der neuen Feuchtestufe dauerte dabei in der Regel 30 Minuten. Die externe Messung der relativen Feuchte schwankte für die programmierten 80 % zwischen 78,5 und 79,5 %. Für die programmierten 30 %rF wurden Werte zwischen 30,9 und 31,4 % gemessen. Die Dauer der klimatischen Alterung ist Tabelle 6.2 zu entnehmen.
Ein Teil der unbelichteten Gewebe wurde während der klimatischen Alterung mit Hilfe der holländischen Spannmethode aufgespannt und regelmäßig nachgespannt. Die Spannung des Gewebes wurde dabei nicht gemessen.[715]
Im Rahmen der Bestimmung der Kettenlänge der Cellulose wurde für die Bestimmung des Trockengewichtes ein Teil des Gewebes N1 für 4 Tage bei 105 °C getrocknet (N1-A-K105-u). Dieses stark getrocknete Gewebe wurde in die Untersuchungen einbezogen, weil es interessant erschien, die Auswirkungen einer vollständigen Trocknung zu beurteilen.

6.1.3 Bleichen der Gewebe

Für die Untersuchung von gebleichten Geweben standen vier weitere neue Flachsgewebe zur Verfügung, welche von Studierenden der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart gebleicht wurden.[716] Das Bleichen der Gewebe erfolgte als Rasenbleiche und orientierte sich an historischen Quellenschriften.[717]

713 Weitere Angaben befinden sich im Anhang B.1.2: Belichtung, S. 301f.
714 Details zum Messgerät im Anhang B.1.2: Klimatische Alterung, S. 303.
715 Ein Protokoll über das Spannen der Gewebe befindet sich im Anhang B.1.2: Protokoll zur Aufspannung der Gewebe während der klimatischen Alterung, S. 303.
716 Bauer 2011; Dornstädter 2011.
717 Bauer 2011.

Zunächst wurden die Gewebe sieben Tage in deionisiertem Wasser eingelegt. Währenddessen wurde drei mal für jeweils 45 Min. mit einem Holzbalken gewalkt (geschlagen). Das Wasser wurde dabei mehrmals gewechselt. Anschließend wurden die Gewebe über Nacht in Pottaschenlauge gelegt. Die Lauge wurde in kochendem deionisiertem Wasser mit 5%igen Anteil angesetzt (pH-Wert 12). Die Gewebe wurden in die heiße Lauge gelegt, und über Nacht darin belassen. Für die anschließende Rasenbleiche wurden die Gewebe tagsüber jeweils ca. 8—9 Stunden unter freiem Himmel ausgelegt. Damit sie nicht den Boden berührten, wurden sie auf Holzstäbchen gespannt. Die Prozedur des Pottaschenlaugenbades und der anschließenden Rasenbleiche wurde an zwanzig aufeinanderfolgenden Tagen wiederholt. Während des Auslegens unter freiem Himmel wurden die Gewebe regelmäßig mit Leitungswasser befeuchtet.
Die vier Gewebe tragen die Bezeichnung N2, N3, N4 und N5. Sie wurden auf die beschriebene Weise gebleicht und mit der Bezeichnung B1 gekennzeichnet. An Gewebe N3 wurde zusätzlich ein alternativer Bleichvorgang durchgeführt, der nur in einem Punkt von der bereits beschriebenen Methode abweicht. Das Befeuchten des ausgelegten Gewebes während der Rasenbleiche erfolgte nicht mit Wasser sondern mit Lauge. Das auf diese Weise behandelte Gewebe trägt die Bezeichnung N3-B2.

Tabelle 6.3: Übersicht der Bleichverfahren von vier unterschiedlichen Flachsgeweben und deren Probenbezeichnung.

Probenbezeichnung	Einlegen in Wasser	Walken	Bäuchen	Befeuchten
N2	-	-	-	-
N2-B1	7 Tage	x	Lauge	Wasser
N3	-	-	-	-
N3-B1	7 Tage	x	Lauge	Wasser
N3-B2	7 Tage	x	Lauge	Lauge
N4	-	-	-	-
N4-B1	7 Tage	x	Lauge	Wasser
N5	-	-	-	-
N5-B1	7 Tage	x	Lauge	Wasser

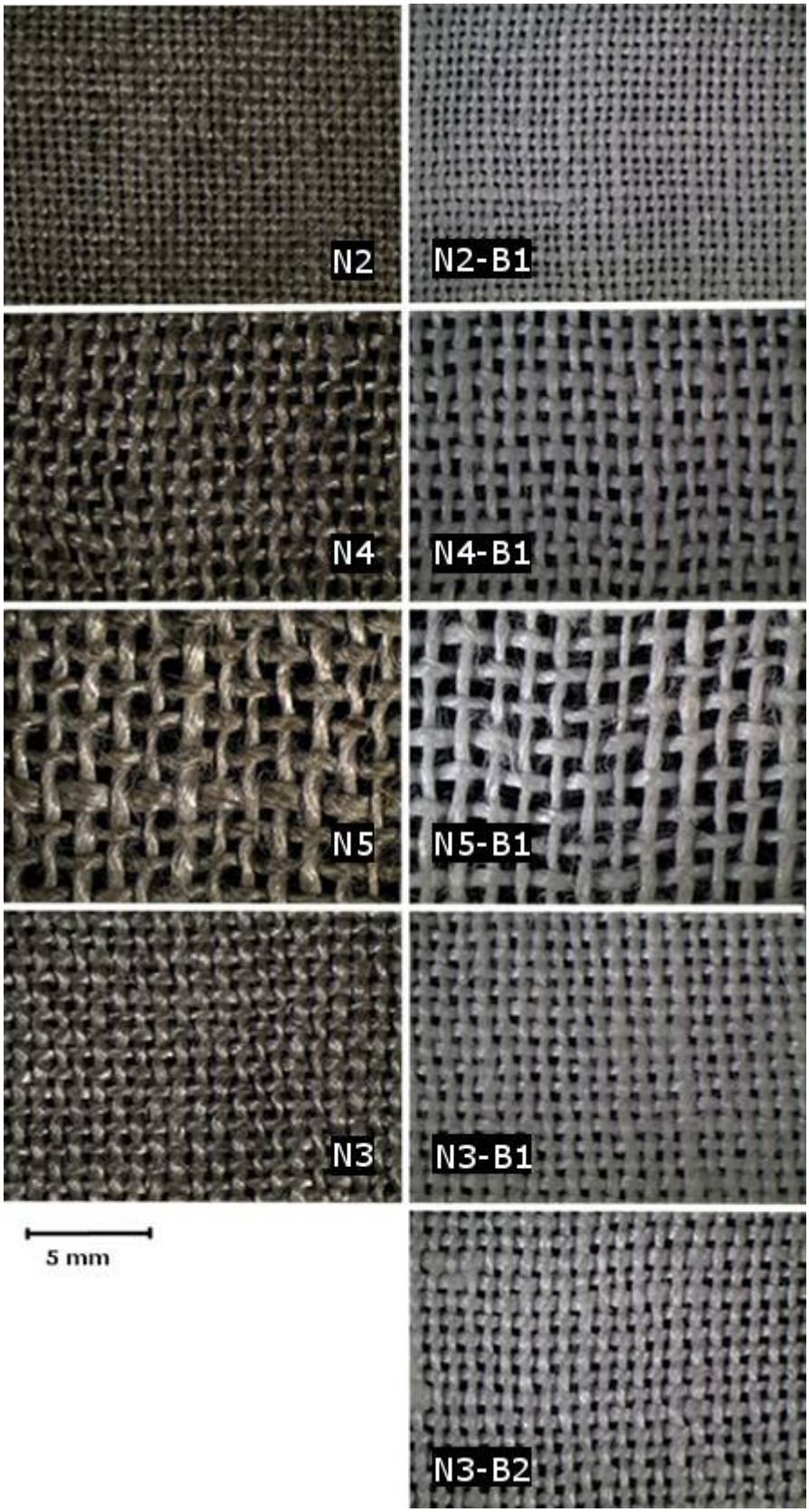


Abbildung 6.3: Neue Flachsgewebe N2—N5 (links) mit gebleichten Pendants (rechts).

6.1.4 Historische Gewebeproben

Die Auswahl der historischen Gewebeproben erfolgte nach Alter und augenscheinlichem Zustand der Gewebe. Es wurde versucht, Gewebeproben unterschiedlichen Alters und Grad der Alterung zu wählen. Es handelt sich um Gemälde, welche in den Ateliers des Studienganges Restaurierung der Hochschule für Bildende Künste Dresden untersucht oder bearbeitet wurden. Bei der Auswahl der Gemälde wurde Wert darauf gelegt, dass ihr Bildträger durch keine größeren Restaurierungsmaßnahmen verändert wurde, wodurch die Beobachtungen und Studien zum Verhalten des Gewebes als das Resultat der natürlichen Alterung interpretiert wurde. Des Weiteren wurden die Gemälde, soweit dies nachvollziehbar, nicht in stabilen, musealen Bedingungen gelagert. Es kann also davon ausgegangen werden, dass sie über lange Zeiträume wechselnden Umgebungsfeuchten ausgesetzt waren.
Die Gewebeproben wurden vom unbemalten Rand entnommen. An allen Bildträgern wurde anhand einer Faseranalyse Flachs nachgewiesen. Tabelle 6.4 gibt eine Übersicht der historischen Gemälde, von deren Bildträger Proben für die Untersuchungen entnommen wurden mit ihren jeweiligen Probenbezeichnungen. Darüber hinaus werden im Folgenden jene Informationen zu den Gemälden im Text zusammengefasst, die für die Interpretation der durchgeführten Untersuchungen relevant erscheinen. Eine genauere Charakterisierung der Leinwände erfolgte durch die Gewebestrukturanalyse, deren Ergebnisse in Tab. 6.5 (S. 220) zusammengefasst sind. Die Einzeldaten sowie weitere Informationen zu den Gemälden sind im Anhang B.2 (S. 304ff) zusammen gestellt. Untersuchungen über die Maltechnik wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt. Sie werden jedoch angegeben, sofern Informationen darüber vorliegen.
Alle historischen Gewebeproben wurden vor Durchführung der Versuche gereinigt. Dafür wurden sie 20 Minuten in 50 °C warmen demineralisiertem Wasser belassen und anschließend mehrfach gespült. Zum Trocknen wurden sie über Nacht bei 40 °C im Trockenschrank gelagert.

Tabelle 6.4: Übersicht der Proben historischer Bildträger, die im experimentellen Teil verwendet wurden.

Probenbezeichnung	**Titel, Künstler**	**Datierung**	**Objekt**	**Maße des Gemäldes (HxB) [cm]**
H-16/17-M	Porträt Philipp Melanchthon Umkreis Lukas Cranach d. J.	Ende 16. Jh./Anfang 17. Jh.	Aufgespanntes Gemälde, Vorleimung, Grundierung, Malschicht, Leinwand gut erhalten, dehnbar und flexibel.	228 x 119
H-17/18-D	Kaiser Friedrich der Andere verleiht dem Deutschen Orden Wappeninsignien, Künstler ubk.	Spätes 17. Jh./frühes 18. Jh. (?)	Aufgespanntes Gemälde, Vorleimung Grundierung, Malschicht, Leinwand dunkel, versprödet und unflexibel.	107 x 141
H-18-E1 H-18-E2 H-18-E2-Cu	Wandbespannung Herrenhaus Ermlitz, Künstler ubk.	2. Hälfte 18. Jh.	Wandbespannung mit dünner Grundierung und Malschicht. Leinwand gebleicht, brüchig, mechanisch kaum belastbar.	270 x 70
H-19-M	König Maximilian I. Joseph, Künstler ubk.	19. Jh.	Ehemals aufgespanntes Gemälde mit Grundierung und Malschicht. Leinwand partiell brüchig, sonst flexibel.	108,5 x 83,5
H-19-T1	Amor erblickt die schlafende Psyche, Adolph Thomas	1873	Aufgespanntes Gemälde mit dünner Grundierung und dünner Malschicht. Leinwand nur an den Spannrändern fragil. Sonst gut erhalten.	120 x 165
H-19-T2	Amor entschwebt der verweifelten Psyche, Adolph Thomas	1873	Aufgespanntes Gemälde mit dünner Grundierung und dünner Malschicht. Leinwand nur an den Spannrändern fragil. Sonst gut erhalten.	120 x 165

Probenbezeichnung	Titel, Künstler	Datierung	Objekt	Maße des Gemäldes (HxB) [cm]
H-20-U1	Frauentorso, Künstler ubk.	20. Jh.	Nicht aufgespanntes Gemälde, Malschicht ohne Grundierung, Leinwand gut erhalten.	89 x 75
H-20-U2	Stadt am Fluss (Heiligenstadt) Albert Ludwig Jahn	20. Jh.	Nicht aufgespanntes Gemälde, Grundierung und Malschicht, Leinwand gut erhalten.	64 x 71
H-20-U3	Erschrockene Frau, Künstler ubk.	20. Jh.	Nicht aufgespanntes Gemälde, Grundierung und Malschicht, Leinwand gut erhalten.	123 x 91
H-20-U4	Junge Frau mit Kopftuch, Künstler ubk.	20. Jh.	Nicht aufgespanntes Gemälde, Grundierung und Malschicht, Leinwand gut erhalten.	113 x 91
H-20-U5	Frau in Tracht, Künstler ubk.	20. Jh.	Nicht aufgespanntes Gemälde, Grundierung und Malschicht, Leinwand gut erhalten.	107 x 80
H-20-H1	Löwe und fressender Leopard, Josef Hegenbarth	Vor 1945?	Aufgespanntes Gemälde mit Grundierung und Malschicht, Leinwand gut erhalten.	56,3 x 44,7
H-20-H2	Auf der Aussichtsplattform, Josef Hegenbarth	Um 1945?	Aufgespanntes Gemälde mit Grundierung und Malschicht, Leinwand gut erhalten.	53 x 75,3

Gemälde Philipp Melanchthon (H-16/17-M)

Das lebensgroße Porträt Philipp Melanchthon wurde an der HfBK Dresden konserviert und restauratorisch bearbeitet, weil es im 2. Weltkrieg stark beschädigt wurde und in diesem Zustand über Jahrzehnte eingelagert war.[718]

Das Gemälde hat für die kunsttechnologische Forschung eine hohe Bedeutung, weil es von späteren Überarbeitungen und Restaurierungen verschont geblieben ist und dadurch noch seinen ursprünglichen Aufbau aufweist. Der handgewebte Bildträger ist aus zwei Gewebebahnen der Länge nach zusammengenäht und auf einen hölzernen Spannrahmen aufgespannt. Das Gewebe ist mit einer dicken Vorleimung (Protein) vorgeleimt. Aufgrund der Schichtdicke ist anzunehmen, dass er im gelierten Zustand aufgetragen wurde. Die Grundierung ist ölhaltig, die Malschicht dünn und ebenfalls ölgebunden.

Während des 2. Weltkrieges entstanden mehrere, teilweise lange, klaffende Risse (Gesamtlänge nahezu fünf Meter) und Löcher. Sie sind auf äußere Einwirkungen zurückzuführen. Aufgrund der anschließenden unsachgemäßen Lagerung, resultierten weitere Folgeschäden. Abgesehen von diesen Schäden ist das Gemälde bemerkenswert gut erhalten. Vor allem die Leinwand ist erstaunlich flexibel und gut erhalten.

Die größte Herausforderung der an der HfBK Dresden durchgeführten Konservierung und Restaurierung war das Schließen eines 140 cm langen Risses im Bildträger. Beim Zusammenführen der weit auseinander liegenden Rissränder, zeigte sich, dass das Gewebe nach Einwirken von Feuchtigkeit gut flexibilisierbar und dehnbar war. Dabei wurde der Bildträger von der Rückseite aus partiell einer erhöhten Luftfeuchtigkeit von 76—80 %rF (mehrere Tage) ausgesetzt und langsam schrittweise gedehnt. Befeuchtungen mittels geringerer Luftfeuchtigkeit reichten nicht aus, das Gewebe zu dehnen.

Aufgrund der Unberührtheit des Gemäldes und des guten Erhaltungszustandes (abgesehen von den Kriegsschäden) der Leinwand wurden Proben dieser Leinwand für den experimentellen Teil ausgewählt.

Kaiser Friedrich der Andere verleiht dem Deutschen Orden Wappeninsignien (H-17/18-D)

Das als Grisaille gemalte Gemälde wurde an der HfBK Dresden im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht, konserviert und restauratorisch bearbeitet.[719]

Die Leinwand ist ein sehr offen gewebtes Netzgewebe mit einer Gewebefüllung von nur 57 %. Die Aufspannung wurde als original eingeschätzt. Das Gewebe ist von der Vorleimung (Prote-

718 Haller et al. 2017.
719 Schmidt 2011.

in und Stärke) und dicken Grundierung (vermutl. Ölgebunden) einseitig stark umschlossen, sodass eine gewisse Steifigkeit zu verzeichnen ist. Das Bindemittel der Malschicht basiert auf einem trocknenden Öl. Ein Überzug ist nicht vorhanden.
Frühere Restaurierungsmaßnahmen sind nicht belegt. Am Gemälde selbst können nur partielle Sicherungsmaßnahmen an der Bildschicht, an den Spannrändern und Rissrändern der Leinwand nachvollzogen werden. Umfassendere Maßnahmen wurden offensichtlich nicht durchgeführt.
Die Leinwand ist stark degradiert und brüchig. Dies macht sich besonders im Bereich der Spannränder bemerkbar. Ein Faden aus diesem Bereich brach bereits nach einmaligem Knicken gerade durch. Die Aufspannung ist aus diesem Grund nur noch an wenigen Punkten gegeben. Die Leinwand ist mehrfach durch Risse bzw. Brüche und Löcher beschädigt.
Proben dieser Leinwand wurden gewählt, weil sie für einen äußerst brüchigen und fragilen Bildträger stehen.

Wandbespannung Herrenhaus Ermlitz (H-18-E1 und -E2)

Im Herrenhaus Ermlitz, Sachsen-Anhalt, befinden sich mehrere Räume, die in den 1770er Jahren mit Wandbespannungen von hoher künstlerischer und handwerklicher Qualität ausgestattet wurden. Ihre Untersuchung, Konservierung und Restaurierung wurde durch die Zusammenarbeit der HfBK Dresden und der Apel'schen Kulturstiftung möglich.
Die Malerei ist auf sehr feinen, augenscheinlich gebleichten Flachsgeweben ausgeführt worden. Sie weisen eine dünne Grundierung und Malschicht in wässriger Technik auf. Die Leinwand mit Grundierung und Malschicht hat lediglich ein Gewicht von ca. 180 g/m^2. In der Malschicht wurden Leim, Stärke und Gummi Arabicum nachgewiesen. Blattmetallauflagen finden sich in den ornamentalen Rocaille-Rahmungen. Sie sind als Mordentvergoldung auf einem wachshaltigen Anlegemittel ausgeführt.
Im Rahmen dieser Arbeit wurden zwei Tapetenbahnen aus dem Weißen Saal berücksichtigt. Ihre genaue Zuordnung kann dem Anhang B.2, S. 329f entnommen werden.
Im Bildträger befinden sich zahlreiche Löcher und Risse, die vielfach auch als Brüche bezeichnet werden können. Insgesamt ist das Gewebe sehr fragil, wenig flexibel, brüchig und hält nur wenig mechanischer Beanspruchung stand. In Bereichen, wo der Bildträger Wassereinbrüchen des Gebäudes ausgesetzt war, ist eine höhere Degradation festzustellen. Ebenfalls stärker abgebaut scheint das Gewebe in jenen Bereichen zu sein, wo die Verwendung eines kupferhaltigen Grünpigmentes in der Malschicht nachgewiesen wurde (siehe auch Abb. B.30, S. 330). Dort ist das Gewebe stark verbräunt und weist vermehrt Brüche auf. In der Papierkonservierung ist dieses Phänomen als Kupferfrass beschrieben. Bezogen auf textile Bildträger blieb es jedoch bislang weitgehend unberücksichtigt. Es wird vermutet, dass die Kupferionen im Beisein erhöhter Feuchtigkeit in das Gewebe migriert sind und dort unter Einfluss von Luftsauerstoff und Licht radikalische Reaktionen in Gang gesetzt haben, was eine erhöhte Oxidation der Cel-

lulose zur Folge hat. Proben, die aus diesem stark verbräunten Bereich entnommen wurden, tragen die Bezeichnung H-18-E2-Cu.
Ältere Restaurierungen sind an der Wandbespannung kaum durchgeführt worden. Sie beschränkten sich auf lokale Reparaturen an den Rückseiten einzelner Bahnen.[720]
Für den experimentellen Teil dieser Arbeit wurden Proben dieses Gewebes gewählt, weil es als Beispiel eines sehr stark abgebauten Gewebes gelten kann, darüber hinaus repräsentiert es einen gebleichten Bildträger.

König Maximilian I, Joseph (H-19-M)

Das Porträt König Maximilian wurde im Rahmen einer Diplomarbeit an der HfBK Dresden konservatorisch bearbeitet.[721] Es wurde nach dem 2. Weltkrieg als zusammengefaltetes Bündel in einer klimatisch instabilen Umgebung gelagert und erst 2010 wieder aufgefunden.
Die Leinwand weist eine hohe Unregelmäßigkeit der Fäden auf. Stellenweise auftretende Webfehler und Knötchen lassen vermuten, dass es sich um ein handgewebtes Gewebe minderer Qualität handelt. An Querschliffen wurde eine Vorleimung nachgewiesen (Protein und evtl. Stärke). In der dünnen Grundierung wurde ein ölhaltiges Bindemittel nachgewiesen. Die Malschicht wurde dünn und glatt aufgetragen und basiert ebenfalls auf einem ölhaltigen Bindemittel.
Durch das Einwirken von Feuchtigkeit lies sich das Gemälde aus dem zusammengefalteten Zustand leicht wieder entfalten und weitestgehend plan legen. In Folge der unsachgemäßen Lagerung war das Gemälde durch eine Vielzahl von Knicken und Rissen im Gewebe geschädigt. Allerdings ist davon auszugehen, dass ein großer Teil der Risse bereits vorher vorhanden war. Am Bildträger sind keine zurückliegenden restauratorischen Maßnahmen erkennbar. Das Gewebe ist flexibel. Rückseitig ist das partielle Einwirken von flüssigem Wasser sichtbar. In diesem Bereich ist das Gewebe stärker degradiert und kaum mechanisch belastbar.

Zwei Gemälde aus dem Zyklus „Amor und Psyche“ von Adolph Thomas

Der insgesamt sechs Gemälde umfassende Zyklus mit dem Titel „Amor und Psyche“ des Malers Adolph Thomas (1834—1887) wird auf 1873 datiert. Vermutlich war er ursprünglich Bestandteil einer Innenraumgestaltung und in eine Wandverschalung montiert. Der gesamte Zyklus wurde an der HfBK Dresden konservatorisch und restauratorisch bearbeitet. Die Untersuchung erfolgte im Rahmen einer Diplomarbeit und während der darauf folgenden Bearbeitungen der Gemälde.[722] Aus dem Zyklus wurden Proben von zwei Gemälden für den experimen-

720 Haller/Hilden 2010; Haller et al. 2012 und Dokumentationsarchiv des Studienganges Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut der Hochschule für Bildende Künste Dresden.
721 Langner 2012.
722 Richter-Kroschewski 2001 und Dokumentationsarchiv des Studiengangs Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut der HfBK Dresden.

tellen Teil entnommen. Beide Gemälde waren zum Zeitpunkt der Probenentnahme noch nicht konservatorisch oder restauratorisch bearbeitet worden. Die Gemälde des Zyklus weisen keinen einheitlichen Aufbau auf, sodass die betreffenden Gemälde getrennt voneinander beschrieben werden.

An einem Teil der Gemälde, des Zyklus sind Schäden durch das Einwirken flüssigen Wassers entstanden. Partiell, an Schwemmrändern an der Rückseite der Leinwand erkennbar, ist flüssiges Wasser in den Bildträger eingedrungen. In diesen Bereichen ist die Leinwand lokal stark geschrumpft, woraufhin sich die Malschicht in diesem Bereich dachförmig aufgestellt hat. Diese Phänomen wird in der Literatur als sogenannter „Wasserschaden" beschrieben und gilt als typisches Phänomen an Leinwandgemälden des 19. Jhs.[723] Die beiden Gemälde, von denen Proben zur Durchführung der Experimente entnommen wurden, zeigten zwar nicht diesen Wasserschaden, jedoch sollen sie stellvertretend für Leinwände stehen, die eine besondere Sensibilität gegenüber flüssigem Wasser zeigen.

Amor erblickt die schlafende Psyche (H-19-T1)

Die Leinwand des Gemäldes besteht aus einem feinen Gewebe. Sie ist auf einem hölzernen Keilrahmen gespannt. Als Vorleimung wurde Stärke nachgewiesen. Auf der dünnen Grundierung liegt zusätzlich eine dünne, mit Bleiweiß pigmentierte Schicht. Die Malschicht ist mit einem ölhaltigen Bindemittel ausgeführt worden. Darauf liegt ein Naturharzfirnis.
Am Zyklus wurde 1921 eine Restaurierung durchgeführt, von der jedoch nicht dokumentiert ist, welche Maßnahmen durchgeführt wurden. Durch Auskeilen des Keilrahmens, sind am Spannrand Risse in der Leinwand entstanden. Weitere kleine Beschädigungen der Leinwand finden sich im Bereich des Spannrandes, während die Leinwand in der Bildfläche intakt ist.
Bis auf die partielle Instabilität der Spannränder ist das Gemälde insgesamt gut erhalten. Die Leinwand macht keinen besonders brüchigen oder fragilen Eindruck.

Amor entschwebt der verzweifelten Psyche (H-19-T2)

Die Leinwand des Gemäldes ist gröber als der feine Bildträger des vorher genannten Gemäldes. Sie ist ebenfalls auf einen hölzernen Keilrahmen aufgespannt und mit Stärke vorgeleimt. Das Gemälde weist keine klassische Grundierung auf, es wurde lediglich mit einer rot-braunen, dünnen Schicht unterlegt. Die dünne, ölhaltige Malschicht ist partiell auf die Rückseite durchgedrungen. Den Abschluss bildet ein Naturharzfirnis.
Am Zyklus wurde 1921 eine Restaurierung durchgeführt, von der jedoch nicht dokumentiert ist, welche Maßnahmen durchgeführt wurden.

723 Siehe Kapitel 3, S. 91.

Bis auf die partielle Instabilität der Spannränder ist das Gemälde insgesamt gut erhalten. Die Leinwand macht keinen besonders brüchigen Eindruck.

Gemäldekonvolut der HfBK Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut (H-20-U1 bis -U5)

Die Entstehungszeit dieser fünf Gemälde liegt im 20. Jh., wobei sie nicht näher datiert sind. Alle Gemälde sind bisher nicht konservatorisch oder restauratorisch bearbeitet worden, dadurch jedoch auch nicht eingehender untersucht worden.
In Vorbereitung der Probenentnahme wurden die Gewebe durch eine Strukturanalyse erfasst (siehe Tab. 6.5, S. 220), die Gemälde jedoch nicht im einzelnen weiter untersucht. Soweit makroskopisch erkennbar ist der maltechnische Aufbau in Tab. 6.4 (S. 211) zusammen gefasst. Alle Gemälde liegen im nicht aufgespannten Zustand vor und wurden über längere Zeit in dieser Form in Räumlichkeiten mit wechselnden Umgebungsbedingungen gelagert. Die Leinwände sind mechanisch in gutem Zustand und weisen keine Schäden auf.
Die Gewebeproben dieser fünf Gemälde repräsentieren innerhalb der hier vorgestellten Experimente relativ junge, gut erhaltene Leinwände.

Zwei Gemälde von Josef Hegenbarth (H-20-H1, H-20-H2)

Es handelt sich um zwei Gemälde des Künstlers Josef Hegenbarth (1884–1962), welche an der HfBK Dresden im Rahmen einer Diplomarbeit untersucht wurden.[724]
Beide Gemälde weisen ihre ursprüngliche Aufspannung auf. Die Leinwände unterscheiden sich leicht voneinander, wie an den Ergebnissen der Gewebestrukturanalyse nachvollziehbar ist. An beiden Gemälden wird eine Vorleimung vermutet, es ist eine Grundierung und Malschicht vorhanden, jedoch kein Überzug.
Beide Gemälde wurden bisher, soweit nachvollziehbar, keiner restauratorischen Bearbeitung unterzogen. Sie befinden sich insgesamt in einem guten Zustand, die Leinwände weisen keine Schäden auf, sind flexibel und, soweit erkennbar, nicht stark degradiert.
Genau wie die fünf Gemälde des Konvoluts aus der HfBK Dresden, stehen die Gewebeproben der Gemälde Hegenbarths für relativ junge, intakte Leinwände.

724 Hellinger 2012.

6.1.5 Benennung der verwendeten Gewebeproben

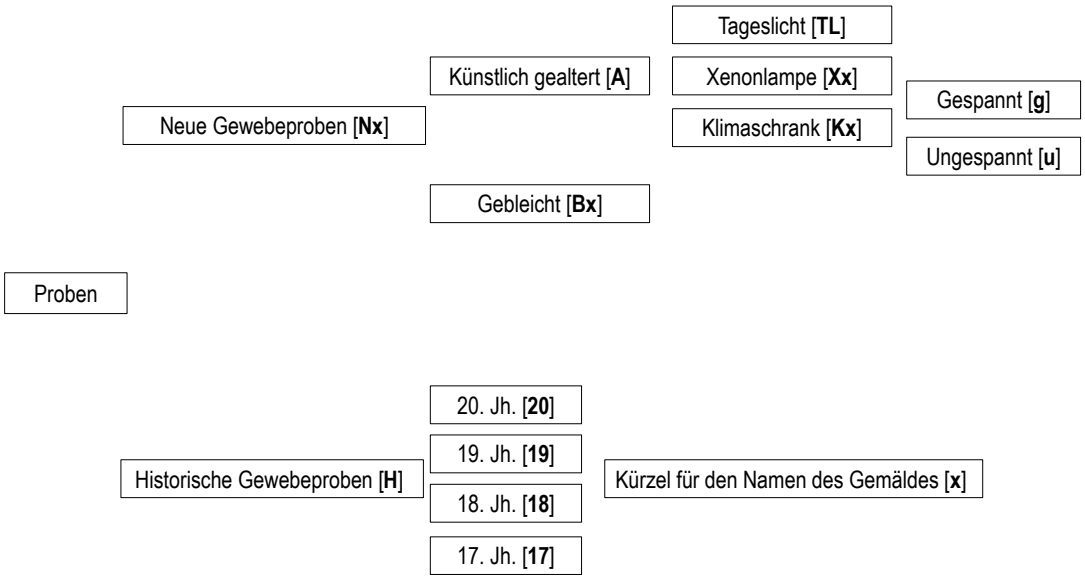


Abbildung 6.4: Benennungsschema der verwendeten Gewebeproben.

Die Benennung der Gewebeproben erfolgte nach dem in Abb. 6.4 dargestellten Schema. Die Variable **x** kennzeichnet die jeweiligen Variationen, die der einzelnen Beschreibungen der Proben entnommen werden kann. Soll die Webrichtung gekennzeichnet werden, erfolgt dies nach dem Probennamen durch die Kürzel (K) für Kette und (S) für Schuss bzw. (R1) und (R2) sofern Kette und Schuss nicht eindeutig bestimmt werden können.

6.1.6 Gewebestrukturanalyse

Durchführung

Alle Gewebe, die im experimentellen Teil verwendet wurden, wurden mittels der Gewebestrukturanalyse (GSA) charakterisiert. Sofern nicht andern erwähnt, wurden die Strukturanalysen der neuen Gewebe an den bereits gewaschenen Geweben durchgeführt. Für das Gewebe N1-A-K105-u konnte keine GSA durchgeführt werden, weil die Probenmenge nicht ausreichte.

Die Größe des Gewebes wird bei der jeweiligen Durchführung der Experimente angegeben, sofern es relevant ist.

Der Verlauf von Kette und Schuss wurde nur beim Vorhandensein einer Webkante bestimmt. Sofern die eindeutige Bestimmung der Webrichtung nicht möglich war, wurden die Richtungen mit R1 = horizontal und R2 = vertikal benannt.

Die Faserart wurde mikroskopisch nach WÜLFERT bestimmt.[725] Die Bindungsart des Gewebes wurde optisch erfasst.[726]
Die Konstruktion und Drehrichtung des Garns wurden optisch erfasst. Der Fasersteigungswinkel wurde anhand von Mikroskopaufnahmen der Gewebe mit Hilfe der Software Leica Application Suite 3.5.0 bestimmt. Die Bestimmung des Winkels erfolgte nach Formel 5.2 (S. 168). Aus 10 Messungen an unterschiedlichen Garnen wurde der Mittelwert gebildet.
Die Bestimmung der Fadenzahl pro cm (Fadendichte) erfolgte nach der von REUMANN vorgeschlagenen Vorgehensweise (s. Tab. 5.2, S. 169).
Die Garnbreite wurde an Mikroskopaufnahmen mit Hilfe der Software Leica Application Suite 3.5.0 auf eine Genauigkeit von 0,01 mm durchgeführt. Der Durchschnitt wurde aus 20 Einzelmessungen an verschiedenen Garnen errechnet.
Die Gewebefüllung wurde nach Formel 5.4 (S. 169) berechnet.
Das Flächengewicht in g/m^2 wurde nur angegeben, sofern es durch die Angabe des Herstellers vorliegt.

Ergebnisse

Die Zusammenfassung der Ergebnisse aller Gewebe ist Tabelle 6.5, S. 220, zu entnehmen. Die Ergebnisse der Einzelmessungen befinden sich im Anhang B.2, S. 304ff.
Durch das erstmalige Waschen des gekauften Gewebes N1 erhöhte sich die Gewebefüllung deutlich von 85 auf 94 %. Gleichzeitig haben Fadendichte und Fasersteigungswinkel zugenommen. Während der künstlichen Alterung des Gewebes N1 haben sich keine einheitlichen Tendenzen in der Veränderung der Gewebestruktur ergeben, mit Ausnahme jener Gewebe, die während der klimatischen Alterung (wiederholtes Quellen und Schwinden) aufgespannt waren. Diese Gewebe hatten eine geringere Gewebefüllung als die nicht gespannten Gewebe, bei gleichzeitiger Abnahme der Fadendichte. Nach der Alterung für 10 Wochen mit zyklisch schwankender Umgebungsfeuchte hatte das nicht gespannte Gewebe N1-A-K10-u eine Gewebefüllung von 94 %, demgegenüber das aufgespannte Gewebe 87 %. Diese Veränderung lies sich auch optisch nachvollziehen (Abb. 6.5, S. 221).

725 WÜLFERT 1999, Kapitel 18.
726 NORM DIN 61101-1.

Tabelle 6.5: Ergebnisse der Gewebestrukturanalyse für alle verwendeten Gewebeproben.
Alle Angaben für Kette/Schuss bzw. R1/R2.

Probenkürzel	Fadendichte	Garnbreite [mm]	Fasersteigungswinkel [°]	Gewebefüllung [%]
N1 ungewaschen	8,00/8,00	0,9/0,6	-/48,6	84,85
N1	8,50/9,00	1,0/0,7	-/65,6	94,32
N1-A-K4-u	8,60/8,90	1,0/0,6	-/61,4	94,26
N1-A-K4-g	8,15/8,20	1,0/0,7	-/64,4	90,14
N1-A-K10-u	8,25/8,80	1,0/0,8	-/65,3	93,98
N1-A-K10-g	8,00/8,25	0,9/0,7	-/63,0	87,21
N1-A-TL	8,80/8,88	1,0/0,7	-/63,6	96,95
N1-A-X84	8,25/8,88	0,9/0,7	-/66,9	92,06
N1-A-X168	8,45/9,00	1,0/0,7	-/66,9	93,57
N1-A-TL-K4-u	8,55/9,00	1,0/0,7	-/66,4	94,77
N1-A-X84-K4-u	8,40/8,65	1,0/0,7	-/67,3	93,18
N1-A-X168-K4-u	8,25/9,00	1,1/0,7	-/63,1	95,20
N2	17,2/18,2	0,4/0,3	71,2/70,1	82,84
N2-B1	17,6/17,8	0,3/0,3	63,5/64,6	84,50
N3	11,8/11,4	0,5/0,5	73,0/73,5	82,80
N3-B1	11,2/11,8	0,5/0,5	65,6/65,6	79,84
N3-B2	11,4/11,4	0,4/0,5	65,6/65,6	80,21
N4	9,40/9,50	0,5/0,5	70,5/72,8	74,52
N4-B1	9,10/10,0	0,5/0,5	61,7/64,6	71,38
N5	6,80/6,50	0,7/0,7	68,1/68,7	68,73
N5-B1	6,50/6,30	0,7/0,6	65,3/66,8	68,36
N6	16/14,2	0,5/0,7	64,9/69,4	98.59
N7	28,75/26,25	0,3/0,4	74,5/60,7	98,2
N8	17/18	0,5/0,4	71,7/71,1	93,45
H-16/17-M	9,00/9,60	0,8/0,9	64,1/62,7	95,88
H-18-E1	15,3/15,7	0,4/0,4	70,4/65,1	88,00
H-19-M	10,2/8,7	0,6/0,7	61,0/62,5	86,21
H-19-T1	16,0/16,9	0,5/0,4	66,6/96,7	92,75
H-19-T2	16,2/14,6	0,6/0,4	62,9/64,2	95,49
H-17/18-D	7,3/5,6	0,5/0,5	65,4/72,0	56,89
H-20-H1	9,88/10,56	0,5/0,6	68,9/71,4	76,72
H-20-H2	10,4/8,9	0,9/0,6	69,6/66,4	97,02
H-20-U1	15,0/13,8	0,7/0,6	66,5/68,9	100,65
H-20-U2	13,2/12,0	0,7/0,6	-	98,60
H-20-U3	13,4/14,4	0,6/0,5	65,3/74,7	96,37
H-20-U4	10,8/10,6	0,6/0,6	68,4/66,2	88,39
H-20-U5	10,6/10,0	0,7/0,7	69,1/65,2	91,1



Abbildung 6.5: Veränderung der Gewebefüllung durch die Alterung im Klimaschrank.
Links ungespanntes Gewebe N1-A-K10-u mit einer Gewebefüllung von 94 %, rechts: aufgespanntes Gewebe N1-A-K10-g mit einer Gewebefüllung von 87 %.

Bei den gebleichten Geweben zeigte sich einheitlich ein deutliches Absinken des Faserstei-gungswinkels gegenüber den nicht gebleichten Geweben. Die Fadendichte blieb nahezu un-verändert, während die Veränderungen der Gewebefüllung unterschiedlich war. Bei den Gewe-ben N3 und N4 verursachte das Bleichen eine Abnahme der Gewebefüllung, bei Gewebe N2 eine Erhöhung und bei dem sehr offen gewebten Gewebe N5 blieb sie unverändert.
Die historischen Bildträger repräsentieren eine große Bandbreite an Gewebestrukturen. Die Gewebefüllungen liegen zwischen 100 und 57 %, die Fadendichten zwischen 17 und 5,6 sowie die Garnbreiten zwischen 0,4 und 0,9 mm. Die Fasersteigungswinkel liegen zwischen 61 und 97 °.

6.2 Charakterisierung der Degradation der Gewebe

6.2.1 Bestimmung des pH-Wertes

Durchführung

Der pH-Wert wurde mit Hilfe einer potentiometrischen Oberflächenelektrode an allen Gewe-beproben durchgeführt, mit Ausnahme der historischen Proben, weil die dafür nötige Durch-tränkung mit Wasser direkt am Gemälde nicht durchgeführt werden sollte.

Zur Anwendung kam eine InLab® Surface Oberflächenelektrode von Mettler Toledo.[727] Vor der Messung wurde sie kalibriert mit pH 7,01 und 4,01. Die Elektrode war angeschlossen an das pH-Messgerät HI 221 von Hanna instruments, welches auf ± 0,01 pH-Einheiten genau misst. Das angeschlossene Thermometer misst auf eine Genauigkeit von ± 0,4 °C.
Für die Durchführung der Messung wurde ein Tropfen demineralisiertes Wasser auf das Gewebe gebracht (pH-Wert 6,78), etwas einmassiert und direkt im Anschluss die Elektrode aufgesetzt. Nach max. 30 s stellte sich ein konstanter Wert ein, der aufgezeichnet wurde. Die Umgebungsbedingungen waren 18 °C und 60 %rF. Aus drei Messungen an unterschiedlichen Positionen im Gewebe wurde der Mittelwert berechnet.

Ergebnisse

Bei allen Geweben stellte sich ein stabiler Wert ein. Die Ergebnisse der Mittelwerte aus jeweils drei Messungen sind in Abbildung 6.6 dargestellt. Die Messwerte aller Gewebe liegen zwischen 5,5 und 8,9. Ergebnisse der Einzelmessungen mit dazugehöriger Standardabweichung sind im Anhang B.3, S. 341 wiedergegeben. Weil für die Messung des Oberflächen pH von Textilien keine Vorschrift vorliegt, wurde für die Beurteilung der Standardabweichung eine Vorschrift für Pappe und Papier herangezogen.[728] Demnach liegt die Standardabweichung für pH-Werte < 6 in der Regel zwischen 0,1 und 0,2, für pH-Werte zwischen 6 und 7,5 kann sie bis zu 0,25 betragen. Diese Empfehlung wird mit Ausnahme einer Probe (N1-A-X168) eingehalten, bei

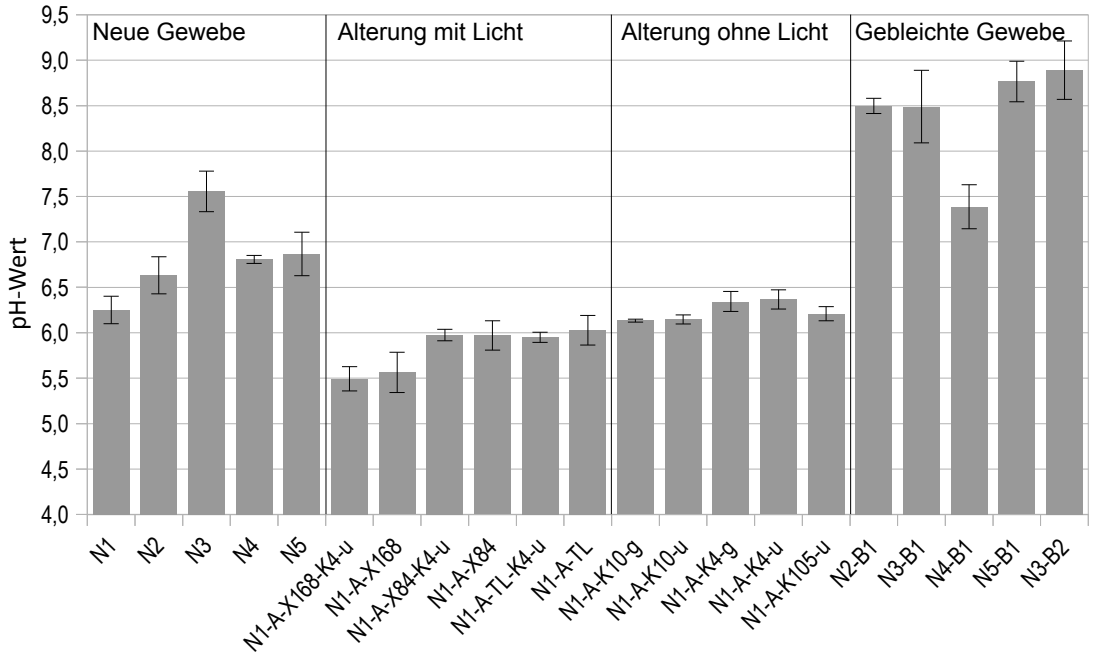


Abbildung 6.6: Ergebnisse der pH-Werte. Mittelwerte aus drei Messungen mit Standardabweichung.

727 InLab Surface KL07 (pH 0—11), Artikel Nr. 51343157.
728 Zellcheming-Merkblatt V/17/80.

der die Standardabweichung um 0,02 höher liegt. Die Ergebnisse wurden daher als reproduzierbar eingeschätzt. Es fehlt der Vorschrift jedoch eine Empfehlung für pH-Werte oberhalb 7,5. Dort sind die Abweichungen etwas höher und liegen im Höchstfall bei 0,4 (N3-B1). Dies ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen.

Die Ergebnisse zeigen, dass der pH-Wert von der hier durchgeführten Alterung und dem Bleichen beeinflusst wird. Tendenziell lag der pH-Wert der künstlich gealterten Gewebe unter dem Wert des dazu gehörigen nicht gealterten Gewebes, welches einen pH-Wert von 6,25 aufzeigte. Die künstliche Alterung bewirkte demnach eine Verschiebung des pH-Wertes in den sauren Bereich. Jene Gewebe, die ohne Lichteinwirkung lediglich im Klimaschrank gealtert wurden, zeigten nur geringfügige Veränderungen im pH-Wert. Dabei lag nach der 4wöchigen Alterung im Klimaschrank der pH-Wert leicht über dem ursprünglichen Wert (6,37), nach der 10wöchigen Alterung im Klimaschrank leicht darunter (6,15). Es zeigte sich kein Unterschied zwischen den aufgespannten und nicht aufgespannten Geweben.
Signifikanter war der Unterschied zwischen nicht gealtertem Gewebe und jenen Geweben, die durch Lichteinstrahlung gealtert wurden. Mit zunehmender Bestrahlungsintensität sank der pH-Wert der Gewebe (Tageslicht, 84h Xenonbogenlampe, 168h Xenonbogenlampe). Die Werte der Gewebe der Belichtung mit Tageslicht und 84h Xenonbogenlampe lagen ca. ½ pH-Wert unter dem neuen Gewebe. Hackney/Hedley erreichten ein vergleichbares Absinken des pH-Wertes (0,7 pH-Einheiten) durch eine viermonatige Einstrahlung von Sonnenlicht hinter Fensterglas.[729] Das 168h belichtete Gewebe mit der Xenonbogenlampe lag um ca. 1 pH-Wert unter dem neuen Gewebe (5,56). Eine Bestrahlung von nur 7 Tagen verursachte also schon ein deutliches Absinken des pH-Wertes. Die daran anschließende Alterung im Klimaschrank lies den pH-Wert nur geringfügig weiter auf 5,49 sinken. Auch Drexler beobachtete an Jutegeweben eine Verschiebung des pH-Wertes in den sauren Bereich.[730]
Das Absinken der pH-Werte aufgrund der Belichtung während der Alterung ist wohl in einer lichtinduzierten Oxidation der Cellulose begründet. Die dadurch entstehenden Aldehydgruppen können weiter zu Carboxylgruppen oxidiert werden, die ihrerseits sauer reagieren und wohl zur Absenkung des pH-Wertes beitragen.[731]
Die gebleichten Gewebe wiesen alle einen deutlich höheren pH-Wert auf, als die jeweils dazugehörigen ungebleichten Gewebe. Die Werte der gebleichten Gewebe lagen zwischen 7,39 und 8,89. Ihr pH-Wert verschob sich um ½ bis knapp 2 pH-Einheiten in den basischen Bereich. Obwohl die Gewebe nach dem Bleichvorgang gewaschen wurden, ist es denkbar, dass Reste der stark basischen Lauge aus dem Bleichprozess im Gewebe zurück geblieben sind und den pH-Wert beeinflussen.[732]

729 Hackney/Hedley 1984, S. 84.2.17.
730 Drexler 1999, S. 73—77.
731 Siehe Kapitel „Oxidation der Cellulose“ S. 127.
732 Siehe „Bleichen der Gewebe“ S. 207.

6.2.2 Bestimmung der Kettenlänge der Cellulose

Durchführung

Als Maß für die Kettenlänge der Cellulose wurde die Grenzviskositätszahl (GVZ) [η] der gelösten Cellulose kapillarviskosimetrisch bestimmt. Als Lösungsmittel für die Cellulose wurde Eisen(III)-Weinsäure-Natriumkomplex gelöst in verdünnter Natronlauge ($EWNN_{mod(NaCl)}$) gewählt. Die Durchführung orientierte sich an der NORM DIN 54270-3. Die Herstellung des Lösungsmittels erfolgte nach dieser Vorschrift. Die Herstellung der $EWNN_{mod(NaCl)}$-Cellulose-Lösung ebenfalls, jedoch mit im Folgenden genannten Änderungen. Alle Garnproben wurden zuvor in 40 °C warmen Leitungswasser gewaschen. Es wurde nicht mit einer konstanten Einwaage gearbeitet, sondern die Einwaage des Fasermaterials wurde so gewählt, dass die relative Viskosität der hergestellten Lösung zwischen 1,1 und 1,5 lag. Aus diesem Grund variierten die verwendeten Fasermengen.[733] Die Einwaage erfolgte auf 0,1 mg genau. Vor allem die historischen Proben geboten die Verwendung möglichst geringer Mengen des Fasermaterials, weshalb möglichst geringe Mengen der Lösung hergestellt wurden. Sofern keine Angabe zur Webrichtung bei den Probennamen angegeben ist, wurde Fasermaterial von Kette und Schuss zu gleichen Anteilen gemischt.

Das Fasermaterial wurde zerkleinert und mit dem Lösungsmittel gemischt. Nach kurzem Schütteln wurden die Lösungen im Wasserbad mit Eiswasser für 1 Stunde belassen. Das anschließende Schütteln bei 18 °C auf einem Schütteltisch (300 Umdrehungen pro Minute) dauerte 16 Stunden. Um nicht gelöste Schwebeteile heraus zu filtern, wurden die Lösungen abschließend mit einer relativen Zentrifugalbeschleunigung von 1698 g für sechs Minuten zentrifugiert.

Für die Bestimmung der Durchflusszeiten des Lösungsmittels und der Lösung wurde das Ubbelohde-Viskosimeter mit hängendem Kugelniveau vom Typ 501 13 / Ic der Firma Schott Instruments verwendet. Für die historischen Garnproben wurde das Mikro-Ubbelohde-Viskosimeter mit hängendem Kugelniveau vom Typ 537 13 / Ic des gleichen Herstellers verwendet. Dieses kleinere Viskosimeter gewährleistete die erforderliche Messgenaugikeit für die historischen Proben, deren Durchflusszeiten deutlich unter den andern lagen. Darüber hinaus war durch die kleinere Kapillare der Mikro-Ubbelohde eine geringere Menge der Lösung erforderlich, wodurch die Probenmenge der historischen Garnproben geringer ausfiel.

Die Kapillare wurde während der Messung im Wasserbad bei konstanter Temperatur von 19 °C ± 0,2 °C gehalten. Bevor die Durchflusszeit gemessen wurde, wurde die jeweilige Lösung 15 Minuten in der Kapillare belassen, um einen Temperaturangleich zu gewährleisten. Die Durchflusszeit der Lösung wurde manuell gemessen mittels einer digitalen Stoppuhr, die eine

733 Die Mengen von Fasermaterial und Lösungsmittel sind für jede Probe in den Protokollen zur Durchführung der Kapillarviskosimetrie im Anhang B.4, S. 344ff angegeben.

Genauigkeit von 0,001 s hatte. Von jeder Lösung wurden fünf Durchflusszeiten gemessen. Von ihrem Mittelwert wurde der Sekundenbetrag laut Hagenbach-Couette-Korrektion abgezogen.[734] Aus den so ermittelten Durchflusszeiten von Lösungsmittel (t_0) und Lösung (t) in Sekunden wurde die relative Viskosität η_{rel} nach Formel 5.8 (S. 177) (t/t_0) berechnet.
Die Grenzviskositätszahl [η] in ml/g wurde nach der Schulz-Blaschke-Gleichung errechnet:[735]

$$\eta = \frac{(\eta_{rel} - 1)/c}{1 + k_\eta \cdot (\eta_{rel} - 1)} \tag{6.1}$$

mit $k_\eta = 0{,}339$ und c = Konzentration der Probe in g/ml. Die Konzentration c in g/ml wurde dabei wie folgt bestimmt:

$$c = \frac{m_{tr}}{Volumen\,Lösungsmittel} \tag{6.2}$$

Die dafür erforderliche Masse der Probe soll sich gemäß Norm auf den ofentrockenen Zustand beziehen. Dafür sollen an separaten Garnabschnitten der Feuchtezuschlag für das Klima, in dem die Einwaage erfolgte (hier 18 °C/60 %rF) ermittelt und von der Einwaage rechnerisch abgezogen werden. Für die Bestimmung des Feuchtezuschlags wurden die Gewebeproben im Trockenschrank bei 105 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Aus dem Gewicht vor und nach der Trocknung wurde der Feuchtezuschlag u nach Formel 3.3 (S. 38) berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 6.6 (S. 226) zusammengefasst, Daten der Einzelmessungen sind im Anhang B.4.2, S. 343ff angegeben.
Für die in dieser Arbeit verwendeten historischen Gewebeproben, stand nicht ausreichend Material zur Verfügung, um den Feuchtezuschlag experimentell zu ermitteln. Aus diesem Grund wurde der Feuchtezuschlag für diese Gewebeproben von anderen Messungen abgeleitet bzw. geschätzt.
Für die Festlegung des Feuchtezuschlags (18 °C/60 %rF) lagen für einen Teil der historischen Proben als Anhaltspunkt die Feuchtezuschläge aus der Erfassung der Sorptionsisothermen bei 25 °C vor und die experimentell ermittelten Feuchtezuschläge der neuen und künstlich gealterten Gewebe, die in Tab. 6.6 angegeben sind (18 °C/60 %rF). Einige Proben wurden durch beide Messreihen erfasst, wodurch offensichtlich wurde, dass die Werte des Feuchtezuschlags aus den Sorptionsisothermen insgesamt geringer waren als jene, die durch die Trocknung bestimmt wurden.[736] Als Grund kann der Temperaturunterschied zwischen 18 und 25 °C angenommen werden, da bei höheren Temperaturen die Menge der aufgenommenen Feuchte abnimmt.[737] Dadurch konnten die Feuchtezuschläge der Sorptionsisothermen nicht ohne weiteres übernommen werden, sondern wurden entsprechend angehoben. Der Betrag, um den die Werte

734 NORM DIN 51562-1 bzw. Bedienungsanleitung der Ubbelohde Viskosimeter von Schott Instruments. Die jeweiligen Werte sind in den Protokollen zur Durchführung der Kapillarviskosimetrie im Anhang B.4, S. 344ff angegeben.
735 NORM DIN 54270-3, S. 3.
736 Die Ergebnisse der einzelnen Messungen sind in Tabelle B.3 im Anhang S. 344 angegeben.
737 Siehe hierzu auch Kapitel 3, S. 40f.

angehoben wurden, entspricht dem Differenzbetrag der Feuchtezuschläge bei 18 bzw. 25 °C für das künstlich gealterte Gewebe N1-A-X168-K4-u.[738] Jene historische Proben, zu denen keine Daten aus der Sorptionsisotherme herangezogen werden konnte, wurden geschätzt.
Die verwendeten Feuchtezuschläge zur Berechnung der Konzentration sind in Tabelle 6.6 zusammengefasst.

Von jeder Probe wurden zwei voneinander unabhängige Messungen durchgeführt, deren Mittelwert das Ergebnis bildet.[739]

Tabelle 6.6: Feuchtezuschlag u [%] (18 °C/60 %rF) aller Faserproben, deren Viskosität bestimmt wurde.

Probenname	***u* [%] experimentell bestimmt**	**Probenname**	***u* [%] abgeleitet**	***u* [%] geschätzt**
N2	7,55	H-16/17-M	6,07	
N2-B1	6,53	H-17/18-D	6,10	
N3	7,22	H-18-E1	6,08	
N3-B1	6,66	H-18-E2	6,08	
N3-B2	6,71	H-18-E2-Cu	6,08	
N4	7,35	H-19-M	6,55	
N4-B1	7,00	H-19-T1	6,80	
N5	8,15	H-19-T2	6,90	
N5-B1	6,95	H-20-H1		6,75
N1	7,25	H-20-H2		6,39
N1-A-K4-u	7,09	H-20-U1		7,00
N1-A-K4-g	7,11	H-20-U2		7,00
N1-A-K10-u	7,07	H-20-U3		7,00
N1-A-K10-g	6,68	H-20-U4		7,00
N1-A-TL	7,25	H-20-U5		7,00
N1-A-X84	7,12			
N1-A-X168	7,30			
N1-A-TL-K4-u	6,96			
N1-A-X84-K4-u	6,81			
N1-A-X168-K4-u	6,21			

738 Die jeweiligen Werte sind vollständig in Tabelle B.3 im Anhang S. 344 angegeben.
739 NORM DIN 54270-3, S. 3.

Ergebnisse

Eine tabellarische Übersicht aller Durchflusszeiten und deren weitere rechnerische Bearbeitung befindet sich im Anhang.[740] Die daraus resultierenden Ergebnisse sind in Abbildungen 6.7, 6.8 und 6.9 zusammengefasst.
Es hat sich gezeigt, dass die Messung der GVZ eine sehr sensible Methode darstellt, um den Zustand der Cellulose zu charakterisieren.
Die Ergebnisse für die beiden unabhängig voneinander durchgeführten Bestimmungen der GVZ lagen innerhalb der Norm vorgegebenen Abweichung von ± 2,5 %.[741] Nur in einem Fall kam es zu einer höheren Abweichung (H-19-T1). Aufgrund der geringen Mengen an Probenmaterial konnte diese Messung jedoch nicht wiederholt werden.
Einfluss auf die Genauigkeit des Ergebnisses nimmt die Konzentration der zu messenden Lösung. Diese Genauigkeit wird beeinflusst durch die Messgenauigkeit der Waage für die Bestimmung der Masse, die Messgenauigkeit des Volumens des Lösungsmittels und der Feuchtezuschlag zur Berechnung der ofentrockenen Masse. Treten diese drei Faktoren in ihrer größten Ausprägung in der ungünstigsten Kombination zueinander auf, kann es zu einer Abweichung der GVZ von 8 % kommen. Dabei handelt es sich um den theoretisch maximal möglichen Fehler für die historischen Proben, weil von diesen aufgrund der Reduzierung der Probenmenge die geringste Masse eingewogen wurde.
Die Temperatur wurde auf 0,2 °C genau eingehalten. Um die Auswirkungen einer schwankenden Temperatur zu beurteilen, wurde eine identische Lösung zwei mal mit einer Temperaturdifferenz von 0,2 °C gemessen. Die Ergebnisse wichen voneinander ab, allerdings lag die Abweichung der GVZ deutlich unter der vorgeschriebenen Abweichung von 2,5 %. Aus diesem Grund wurde diese Ungenauigkeit akzeptiert.

Die Werte der GVZ der künstlich gealterten Gewebe lagen zwischen 1957 ml/g (N1) und 1011 ml/g (N1-A-X168-K4-u). Die künstlich gealterten Gewebe zeigten im Vergleich untereinander deutliche Abstufungen. Sie sortierten sich in Folge der Intensität ihrer Alterung sinnvoll nach absteigender GVZ (Abb. 6.7). Die künstliche Alterung hat demzufolge eine nachweisbare Schädigung an der Cellulose verursacht. Zu jeder Probe ist in Abb. 6.7 ihre prozentuale Abnahme in Bezug zum nicht gealterten Gewebe N1 angegeben.
Die Belichtung im Xenotest® verursachte eine deutliche Schädigung und liess die GVZ um 26 % (N1-A-X84) bzw. 34 % (N1-A-X168) sinken. Demgegenüber hat die Belichtung mit Tageslicht (N1-A-TL) kaum Schädigung der Cellulose verursacht.
Die bloße klimatische Alterung verursachte eine geringere Schädigung als die Belichtung mit der Xenonbogenlampe. Die Abnahme der GVZ reduzierte sich um 13,5 % bzw. 22,8 %. Waren die Gewebe während der klimatischen Alterung gespannt, reduzierte sich GVZ noch weiter (Proben N1-A-K10-u und N1-A-K10-g bzw. N1-A-K4-u und N1-A-K4-g).

740 Anhang B.4, S. 344ff.
741 NORM DIN 54270-3, S. 3.

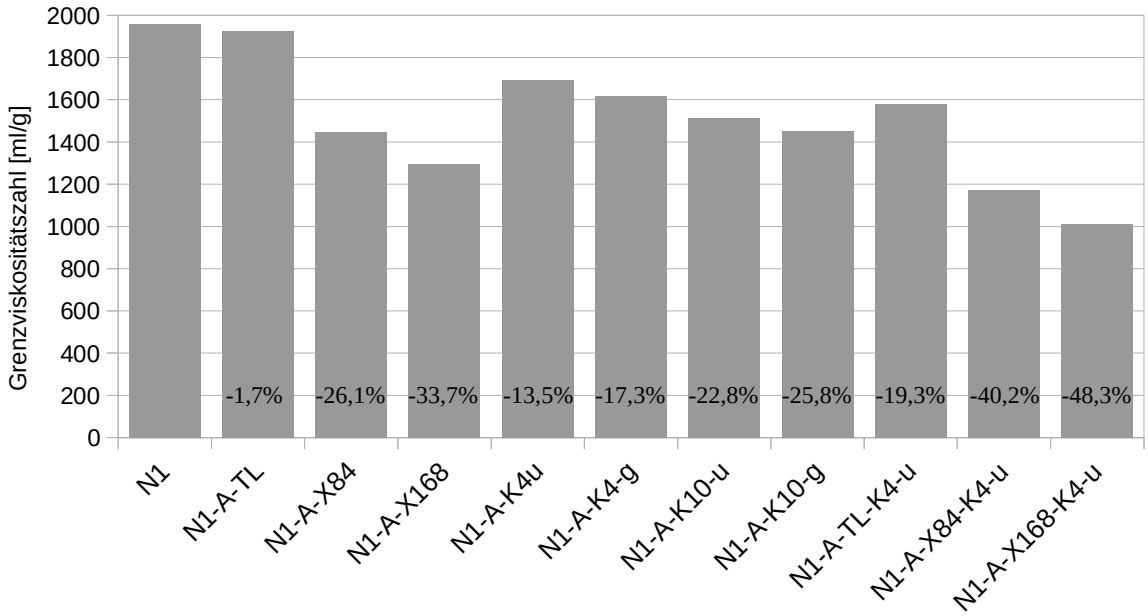


Abbildung 6.7: Grenzviskositätszahl η [ml/g] der künstlich gealterten Gewebe mit der jeweiligen prozentualen Abnahme im Vergleich zum neuen Gewebe N1.

Die größte Schädigung der Cellulose wurde durch die Kombination von Belichtung und anschließender klimatischen Alterung verursacht und führte zu einer Abnahme der GVZ um nahezu der Hälfte. Sie entsprach in ihrem Ausmaß der Summe beider einzelnen Alterungsformen. Die Belichtung beschleunigte die anschließende klimatische Alterung nicht.
Die GVZ der vier Flachsgewebe N2, N3, N4 und N5, welche auch als gebleichte Gewebe vorliegen, waren mit dem neuen Flachsgewebe N1 vergleichbar. Sie lagen zwischen 1919 und 1847 ml/g. Alle fünf gebleichten Gewebe zeigten im Vergleich zu ihren ungebleichten Pendants einen deutlichen Abfall der GVZ zwischen rund 50 % und 64 % (Abb. 6.8). Bleichmethode 1 (B1) verursachte einen relativ ähnlichen Abfall der GVZ bei allen vier Geweben um rund 50 %. Bleichmethode 2 (B2), die allerdings nur an einem Gewebe durchgeführt wurde, liess die GVZ stärker sinken, um rund 64 % (N3-B2). Diese etwas stärkere Schädigung der Cellulose ist darauf zurückzuführen, dass die Befeuchtung während der Rasenbleiche nicht mit Wasser erfolgte, sondern mit Lauge. Dass es dadurch zu einer Vermehrten Schädigung der Celluloseketten kommt, wurde bereits von Kind indirekt nachgewiesen, indem er durch die Anwesenheit von Alkalien während der Rasenbleiche einen stärkeren Verlust der Festigkeit verzeichnete.[742]

Die im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Werte sind vergleichbar mit den Ergebnissen von Stoll/Fengel die eine Reduktion der GVZ an gebleichten Flachsgeweben um 52 bzw. 57 % feststellten.[743]

742 Kind 1932.
743 Stoll/Fengel 1982. Vrgl. auch Tabelle 3.1, S. 44.

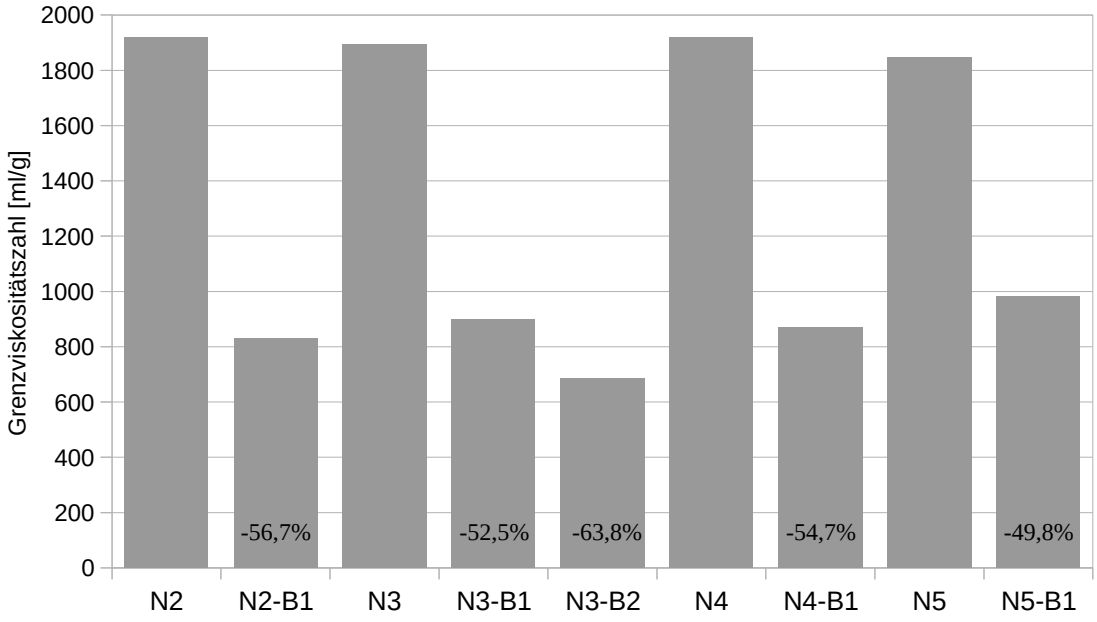


Abbildung 6.8: Grenzviskositätszahl η [ml/g] der ungebleichten und gebleichten Gewebe mit der jeweiligen prozentualen Abnahme im Vergleich zum ungebleichten Gewebe.

Die Werte der GVZ fielen für die historischen Proben insgesamt niedriger aus als für die neuen, künstlich gealterten und gebleichten Gewebe. Sie lagen zwischen 975 und 90 ml/g (Abb. 6.9) und schließen damit an den unteren Bereich der künstlich gealterten Gewebe an. Das Alter der Bildträger spiegelt sich nicht im Detail in der GVZ wider, jedoch liegen die Bildträger des 20. Jhs. im oberen Bereich, die Bildträger des 19. Jhs. im mittleren Bereich und die Bildträger des 16.—18. Jhs. im unteren Bereich. Die niedrigsten Werte wiesen die Bildträger der Wandbespannung aus Ermlitz, das Deutschorden-Gemälde und der Bildträger des Melanchthon-Porträts auf (alle unterhalb bzw. um 300 ml/g). Im mittleren und oberen Bereich zwischen 300 und 975 ml/g lagen alle übrigen Proben von Bildträgern aus dem 19. und 20. Jh.
Für die vier niedrigsten Werte der GVZ lassen sich Bezüge zwischen GVZ und Zustand der Bildträger herstellen. So weisen die Bildträger der Wandbespannung des Herrenhauses in Ermlitz die geringsten Werte der GVZ auf. Diese Gewebe sind äußerst fragil und zeigten sich im Handling als spröde und brüchig. Es ist zu vermuten, dass ein Teil der Schädigung der Celluloseketten auf das Bleichen des Gewebes vor der Verwendung als Bildträger verantwortlich ist. Es wurden auch Proben aus den stark verbräunten Gewebebereichen entnommen, von denen angenommen wird, dass Kupferionen aus der Malschicht die Degradation des Gewebes beschleunigt haben. Die Ergebnisse zeigten, dass die Kettenlänge der Cellulose in den verbräunten Gewebebereichen (H-18-E2-Cu) deutlich niedriger lag als in den hellen Bereichen (H-18-E2). Die GVZ wurde durch die Anwesenheit von Kupfer von 175 auf 90 ml/g nahezu halbiert. Auch der Bildträger des Deutschorden-Gemäldes (H-17/18-D) ist äußerst fragil und brüchig, was sich in einer GVZ von 218 ml/g widerspiegelt.
Oberhalb einer GVZ von 300 ml/g liessen sich jedoch keine Rückschlüsse zwischen Zustand der Bildträger und der GVZ herstellen, weil eine Differenzierung der Festigkeit der jeweiligen

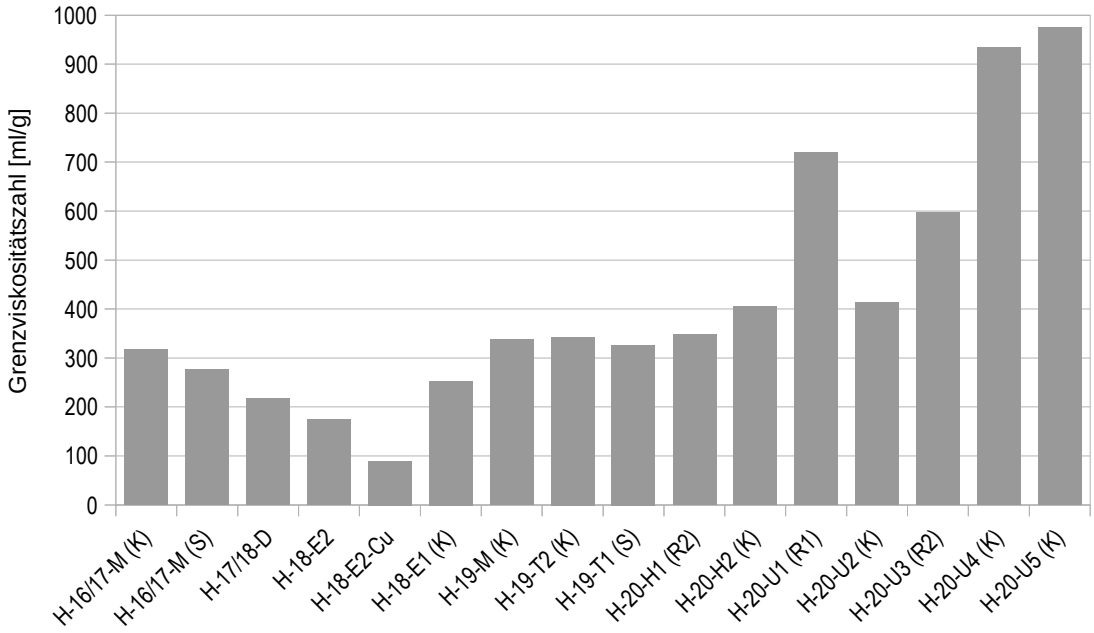


Abbildung 6.9: Grenzviskositätszahl η [ml/g] historischer Proben.

Bildträger rein empirisch nicht möglich war. So wies der Bildträger des Melanchthon-Porträts (H-16/17-M) eine relativ geringe GVZ von 319 ml/g auf, zeigt jedoch eine hohe Stabilität und Flexibilität im Handling und während der Bearbeitung des Gewebes im Zuge der umfangreichen Rissverklebungen.

Ein Vergleich der im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Werte mit anderen publizierten Werten ist nicht ohne weiteres möglich, weil Daten über die Kettenlänge der Cellulose bisher in der Regel als durchschnittlicher Polymerisationsgrad (DP) angegeben wurden. Warum es dennoch sinnvoll ist, die GVZ zu bestimmen und eine Vergleichbarkeit zum DP nicht gegeben ist, wurde bereits diskutiert.[744] Lediglich Backes führte Messungen unter Anwendung der gleichen Methodik an einem neuen Flachsgewebe durch.[745] Sie berechnete aus den jeweiligen Durchflusszeiten die relative und spezifische Viskosität. Um die Ergebnisse zu vergleichen, wurde daraus im Rahmen der vorliegenden Arbeit die GVZ berechnet. Die Berechnung ergab eine GVZ von 1579 (unbehandeltes Gewebe) und 1588 ml/g (gewaschenes Gewebe). Es wird jedoch vermutet, dass Backes die Probenmasse zur Bestimmung der Konzentration *c* nicht auf den ofentrockenen Zustand bezogen hat. Aus diesem Grund wurde für die neuen Flachsgewebe ein Feuchtezuschlag von 7,5 % angenommen. Die Annahme von 7,5 % basiert auf dem Durchschnitt der Messungen des Feuchtezuschlags aller neuen Gewebe im Rahmen dieser Arbeit (siehe Tab. 6.6, S. 226). Unter Berücksichtigung dieses Feuchtezuschlags ergibt sich eine GVZ von 1707 (unbehandelt) bzw. 1716 ml/g (gewaschen). Diese Werte liegen etwas unter den neu-

744 Siehe Kapitel 5.2.2 „Kapillarviskosimetrie“ S. 177f.
745 Backes 2005, S. 138.

en Geweben, die im Rahmen dieser Arbeit gemessen wurden, passen aber prinzipiell gut zusammen.

6.2.3 Bestimmung der Kristallinität der Cellulose

Durchführung

Die Bestimmung der Kristallinität erfolgte mit Hilfe eines FT-IR Transform Infrarot Spektrometers mit angeschlossenem IR Mikroskop.[746]
Die Garne wurden mit Hilfe eines Mikroskops soweit wie möglich mechanisch in einzelne technische Fasern aufgetrennt, um möglichst kleine Faserbündel zu erhalten. Diese wurden in einer Diamantzelle (Germanium) von Hand gepresst. Nach dem Öffnen der Diamantzelle wurde die Faserprobe im FT-IR Spektrometer durch das angeschlossene Mikroskop bei 150facher Vergrößerung positioniert und in Transmission vermessen. An zwei bis fünf Faserbündeln wurden insgesamt mindestens 20 Spektren an unterschiedlichen Positionen aufgenommen. Die Auflösung betrug 4 cm^{-1}. Es wurde mit 32 scans pro Spektrum gemessen, die Schneidenblende war auf 50 µm eingestellt. Ein Vergleich mit 100 Scans pro Spektrum brachte keine erhöhte Präzision. Die Spektren wurden ohne vorherige Grundlinienkorrektur ausgewertet. Die Messung der Höhe der jeweiligen Transmissionsminima erfolgte an den Transmissionsspektren in der Software LibreOffice Draw. Die dafür nötigen lokalen Hilfslinien wurden wie folgt positioniert:

Hilfslinie für 2900 cm^{-1}	Zwischen Transmissionsmaximum nahe 3000 cm^{-1} und 2750 cm^{-1}. Wenn vor der Wellenzahl 2750 cm^{-1} eine Schulter lag, wurde die höhere Schulter als Bezugspunkt für die Hilfslinie herangezogen.
Hilfslinie für 1372 cm^{-1}	Zwischen den benachbarten Transmissionsmaxima bei ca. 1290 cm^{-1} und 1410 cm^{-1}.

Die Berechnung des Kristallinitätsindexes erfolgte nach Formel 6.3.

$$C.I. = \frac{a_{1372\,cm^{-1}}}{a_{2900\,cm^{-1}}} \tag{6.3}$$

746 FT-IR Transform Infrarot Spektrometer TENSOR 27, Fa. Bruker, mit IR Mikroskop HYPERION 2000.

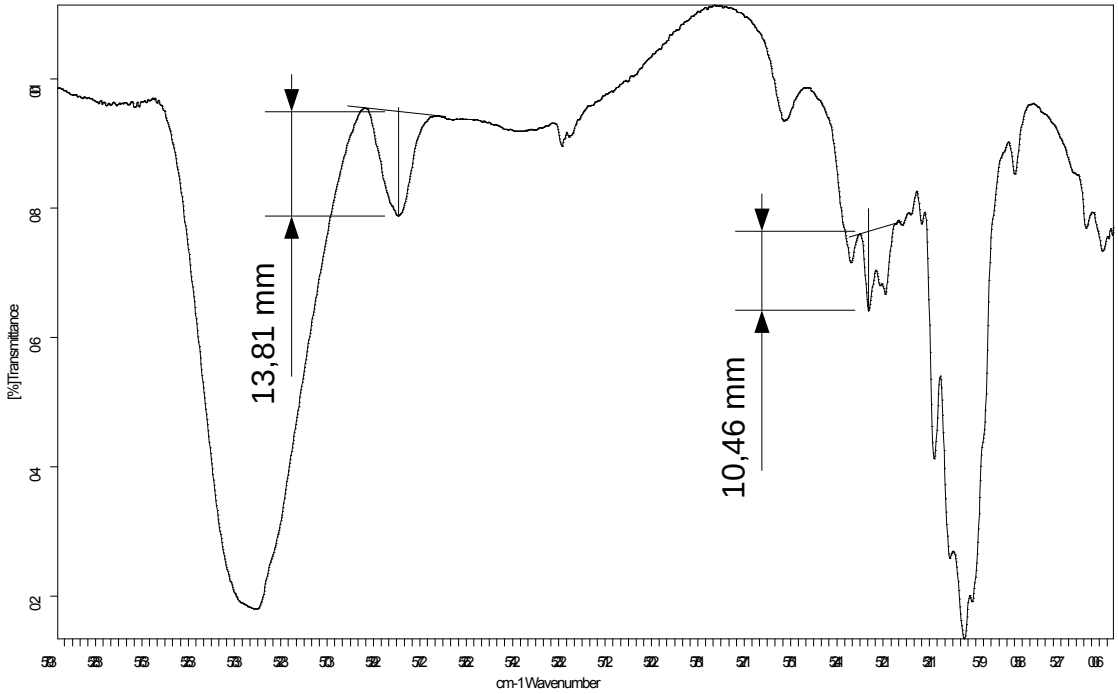


Abbildung 6.10: IR-Spektrum der Probe N1 Kettfaden mit Auswertung.

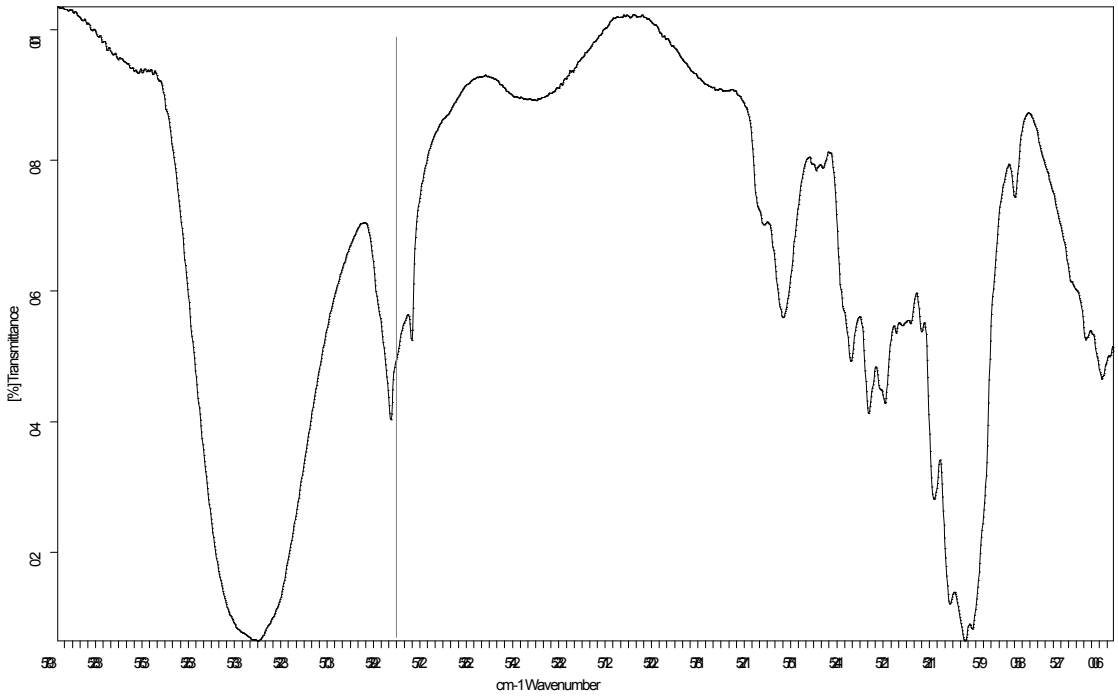


Abbildung 6.11: IR-Spektrum der historischen Faserprobe H-17/18-D mit Doppelspitze.

Die graue Linie markiert das Transmissionsminimum bei 2900 cm^{-1} welches für die Berechnung des C. I. herangezogen wird.

Ergebnisse

Abbildung 6.10 zeigt beispielhaft ein IR-Spektrum der Probe N1 mit der Vermessung der Transmissionsminima bei 2900 cm^{-1} und 1372 cm^{-1}. Die Ergebnisse der jeweiligen Kristallinitätsindizes sind in Abb. 6.12 gegeben. An den dort eingezeichneten Standardabweichungen wird ersichtlich, dass die Ergebnisse eine gewisse Streuung zeigten. Aus diesem Grund wurde die Anzahl der Messungen entsprechend hoch gewählt. Ergebnisse aus anderen Publikationen zeigen ähnlich hohe Streuungen.[747]

Einige Spektren zeigten bei 2900 cm^{-1} eine Doppelspitze (Abb. 6.11). Betroffen waren einzelne Spektren der Faserproben N1, N1-A-K105-u, N2-B1, N3, H-16/17-M und H-17/18-D. Als mögliche Ursache für dieses Phänomen wurde das Vorhandensein eines Öls (Alkydbande) in Erwägung gezogen. Jedoch kam es auch bei Faserproben zu einer Doppelspitze, bei welchen das Vorhandensein von Öl sehr unwahrscheinlich ist. Die Ursache konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht abschließend geklärt werden, weil dafür weiterführende Untersuchungen nötig sind. Die Spektren mit der Doppelspitze wurden nicht in die Auswertung einbezogen.

Alle Einzelwerte der Messungen sind in Anhang B.5.1, S. 351ff wieder gegeben. Der daraus errechnete Mittelwert ist in Abb. 6.12 dargestellt. Insgesamt liegen die Werte des Kristallinitätsindexes zwischen 0,57 und 0,86. Die neuen Gewebe N1, N2, N3 und N5 liegen im Bereich zwischen 0,69 und 0,86. Die künstlich gealterten Gewebe liegen sehr dicht am neuen Gewebe N1 mit einem C. I. von 0,79. Es kam zu einer leichten Erhöhung des C. I. bei dem für 10 Wochen

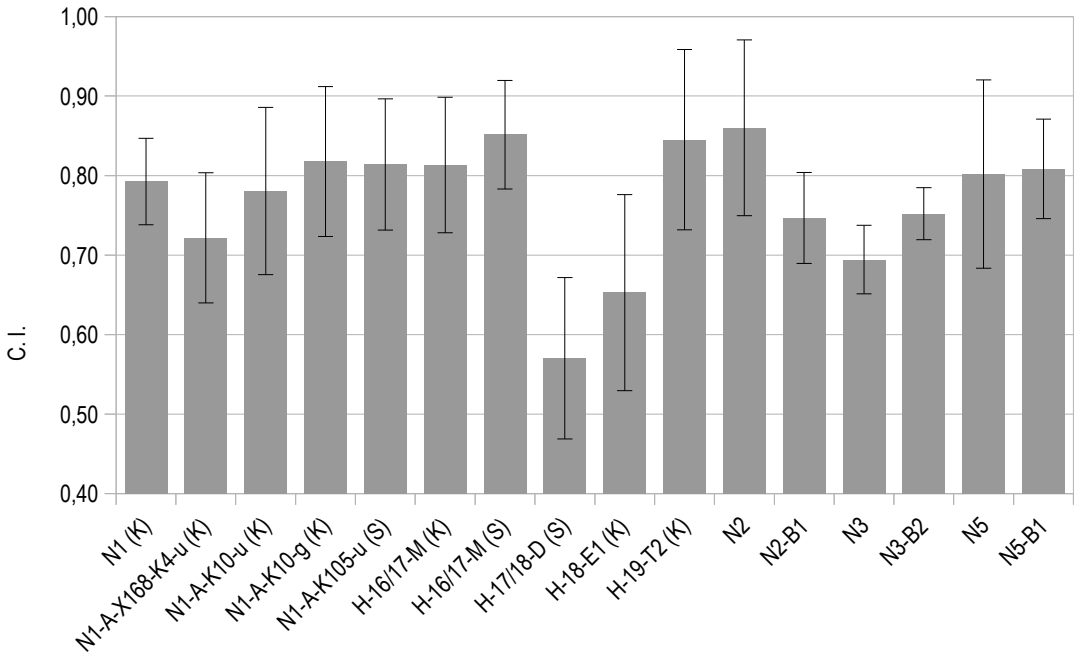


Abbildung 6.12: Mittelwerte des Kristallinitätsindex C. I. mit Standardabweichungen.

747 Kavkler et al. 2011, S. 578–579 und Tab. 6.7, S. 235

aufgespannt klimatisch gealterten Gewebe (N1-A-K10-g: 0,82) und jenes Gewebe, welches bei 105 °C getrocknet wurde (N1-A-K105-u: 0,81). Das für 10 Wochen ungespannt im Klimaschrank gealterte Gewebe ist mit einem Wert von 0,78 fast identisch zum neuen Gewebe. Das belichtete und klimatisch gealterte Gewebe N1-A-X168-K4-u zeigte den größten Unterschied zum neuen Gewebe und lag mit einem C. I. von 0,72 etwas niedriger. Die relativ allgemein angenommene Aussage, dass es mit der Alterung zu einem Anstieg der Kristallinität der Cellulose kommt, kann durch diese Ergebnisse nicht bestätigt werden. Einen leichten Anstieg der Kristallinität konnte nur durch die Trocknung bei hoher Temperatur (105 °C) und wiederholtes Quellen und Schwinden im aufgespannten Zustand erreicht werden. In den anderen Fällen der künstlichen Alterung kam es zu einem Absinken des C. I.
Das Bleichen der Gewebe verursachte sowohl eine Erhöhung als auch eine Erniedrigung des C. I. Bleichmethode 1 bewirkte bei Gewebe N2 eine Verringerung der Kristallinität, bei Gewebe N5 war sie gleichbleibend. Bleichmethode 2 liess die Kristallinität an Gewebe N3 ansteigen. Die Befeuchtung der Gewebe mit Lauge während der Rasenbleiche (Methode 2) im Gegensatz zu Wasser (Methode 1) hat sich auf die Kristallinität ausgewirkt. Unter der Berücksichtigung der Untersuchungen von Fakin et al. haben alkalische Vorbehandlung und anschließende Bleiche gegenteilige Effekte auf die Kristallinität, sodass es je nach Dauer und Intensität durchaus zu unterschiedlichen Tendenzen kommen kann.[748]
Der Kristallinitätsindex lässt sich nicht mit dem Alter der historischen Bildträger in Zusammenhang bringen. Die Ergebnisse lagen in der gesamten Werteskala zwischen 0,57 und 0,85. Die Bildträger des Deutschordengemäldes (H-17/18-D) und der Wandbespannung Ermlitz (H-18-E1) zeigten mit 0,57 und 0,65 sehr niedrige Werte, im höheren Wertebereich lagen die Proben der Gemälde des Melanchthon-Porträts (H-17/18-M) und von Adolf Thomas (H-19-M) mit einem C. I. von 0,85. Verglichen mit der empirisch eingeschätzten Festigkeit der Bildträger zeigten die beiden sehr fragilen Bildträger niedrige, die als stabil und flexibel eingeschätzten Bildträger hingegen hohe Werte für den C. I.

Die hier ermittelten Ergebnisse lassen sich nicht ohne Weiteres auf publizierte Beispiele übertragen, weil für einen uneingeschränkten Vergleich identische Methoden angewandt sein müssen. Davon ungeachtet, liegen die hier gemessenen Werte in einem vergleichbaren Bereich mit den bisher publizierten Werten.[749]
Mit der identischen Methode bestimmt wurden die Werte von Kavkler et al., von deren Ergebnissen eine Auswahl in Tab. 6.7 angegeben sind. Jedoch bleibt in der Publikation offen, wie die einzelnen Banden ausgewertet wurden. Hier könnten Unterschiede bestehen, die das Ergebnis beeinflussen.[750] Von Kavkler et al. wurden historische Bildträger gemessen, die im gleichen Wertebereich liegen, wie die im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Werte. Auch bei Kavkler et

748 Siehe Kapitel 3 „Bleichen“ S. 80f.
749 Siehe Tabelle 3.2, S. 50.
750 Siehe Kapitel 5.2.3 „Auswertung der Spektren“ S. 181.

al. lässt sich der C. I. nicht mit dem Alter der Bildträger in Zusammenhang bringen. Andere Informationen zum Zustand der Bildträger sind der Publikation nicht zu entnehmen.

Tabelle 6.7: Ergebnisse Kristallinitätsindex für historische Bildträger aus Kavkler et al. 2011, S. 578.

	C.I.	STABW
Flachsbildträger Gemälde 1. Hälfte 19. Jh.	0,7022	0,1444
Flachsbildträger Gemälde Ende 17. Jh.	0,8308	0,2902
Flachsbildträger Gemälde 1582-1584	0,6724	0,1268
Flachsbildträger Gemälde 17. Jh.	0,5894	0,1484
Flachsbildträger Gemälde 1821	0,8639	0,0597

Vor einer zukünftigen Anwendung dieser Methode zur Bestimmung der Kristallinität wäre eine inhaltliche Auseinandersetzung mit den unterschiedlichen Möglichkeiten, der Auswertung der Spektren. Das betrifft sowohl die vor der Auswertung mögliche Grundlinienkorrektur, sowie die Position der Hilfslinien. Ob die hier gewählte Variante, inhaltlich am sinnvollsten ist, kann nicht im vollen Umfange beurteilt werden. Darüber hinaus wäre es wünschenswert, das Auftreten der Doppelspitze bei 2900 cm^{-1} weiter zu untersuchen.

Insgesamt erlauben die vorliegenden Ergebnisse keine Rückschlüsse zwischen Kristallinität und Alter oder Zustand der Proben.

6.2.4 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

Durchführung Streifen-Zugversuch an Geweben

Die Bestimmung der Höchstzugkraft F_H und der Höchstzugkraftdehnung ε_H wurde mit Hilfe eines einfachen Zugversuchs, dem Streifen-Zugversuch, an den künstlich gealterten Geweben durchgeführt. Gebleichte und historische Gewebe standen hierfür nicht in ausreichender Menge zur Verfügung.
Die Prüfung wurde in Anlehnung an NORM DIN EN ISO 13934-1 und Reumann durchgeführt.[751] Die Probengröße und Prüfgeschwindigkeit wichen davon ab.[752] Die Messbedingungen waren wie folgt:

Freie Einspannlänge: 100 mm
Breite: 50 mm, davon jeweils 7 mm an den Längsseiten ausgefranst
Prüfmaschine: ZMART.PRO (Fa. Zwick/Roell)
Prüfgeschwindigkeit: 50 mm/min

751 Reumann 2000f, S. 405—409.
752 Für Erläuterungen siehe Kapitel 5.2.4 „Einfacher Streifen-Zugversuch am Gewebe“ S. 186.

Vorspannkraft: 2 N
Temperatur: 18 °C, Luftfeuchtigkeit: 60 %rF

Alle Gewebe wurden in Richtung der Schussfäden geprüft. Klemmbrüche wurden nicht als gültiges Ergebnis gewertet. Von jeder Probenart wurden aus fünf gültigen Messergebnissen der Mittelwert gebildet. Die Ergebnisse für Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung wurden durch die Software der Zugprüfmaschine bereitgestellt. Die Höchstzugkraft wurde auf 1 N, die Höchstzugkraftdehnung auf 0,1 % gerundet.

Ergebnisse

Die Ergebnisse für die Höchstzugkraft F_H werden in Newton (N), die Ergebnisse der Höchstzugkraftdehnung ε_H in Prozent (%) angegeben.

Die Ergebnisse der Einzelmessungen sind Anhang B.6.1, S. 356 einzusehen, die daraus gebildeten Mittelwerte sind in Abb. 6.13 dargestellt. Die Höchstzugkraft liegt für das nicht gealterte Gewebe N1 bei 579 N. Für einen Großteil der künstlich gealterten Gewebe hat sich die Höchstzugkraft um 5 bis 7 % verringert, wobei die Ergebnisse dicht beieinander liegen. Dazu gehören jene Gewebe, die nur belichtet bzw. nur im Klimaschrank gealtert wurden. Die künstliche Alterung hat in diesen Fällen eine geringe Reduktion der Höchstzugkraft bewirkt. Ein belichtetes Gewebe zeigt eine Erhöhung der Höchstzugkraft um 1 %, unter Berücksichtigung der Standardabweichung liegt dieses Ergebnis jedoch innerhalb der Schwankungsbreite. Die Kombination von Belichtung durch Tageslicht und anschließender klimatischer Alterung (N1-A-TL-K4-u) resultierte in einer um 5 % verringerten Höchstzugkraft.

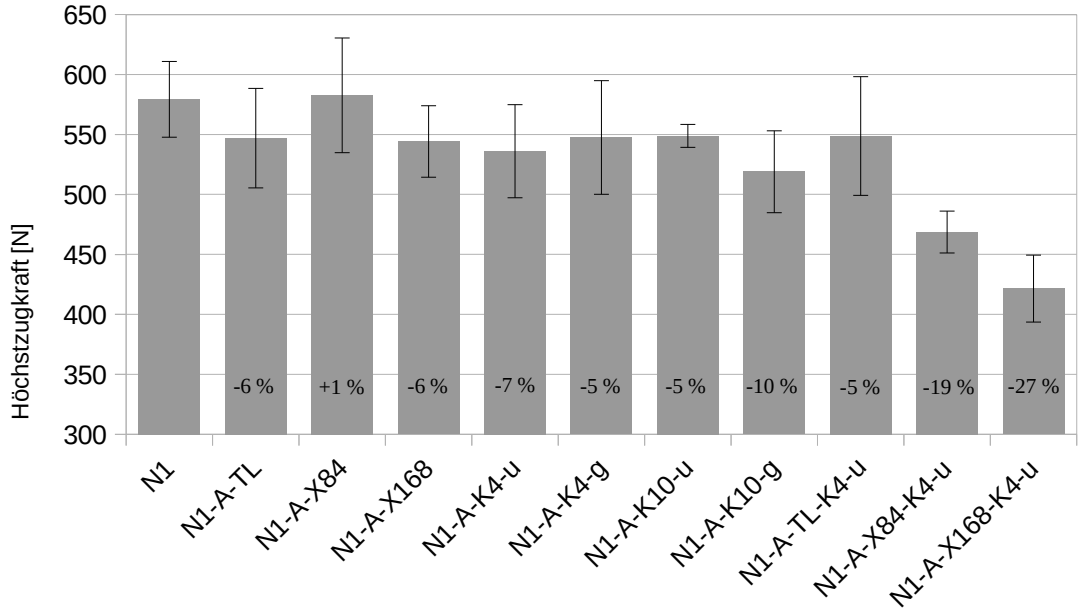


Abbildung 6.13: Ergebnisse der Höchstzugkraft [N] der künstlich gealterten Gewebe und ihre prozentuale Abnahme im Vergleich zum nicht gealterten Gewebe N1.
Mittelwerte aus 5 Messungen mit Standardabweichung.

Signifikante Veränderungen hingegen, haben die Kombination von Belichtung mit der Xenonbogenlampe und klimatische Alterung bewirkt, sowie die Aufspannung während der klimatischen Alterung für 10 Wochen. Das Gewebe welches 10 Wochen gespannt im Klimaschrank gealtert wurde (N1-A-K10-g) verlor 10 % der Höchstzugkraft gegenüber dem Wert des neuen Gewebes. Den größten Verlust, mit 19 bzw. 27 % des ursprünglichen Wertes, zeigten jene Gewebe, die durch eine Xenonbogenlampe belichtet und anschließend klimatisch gealtert wurden (N1-A-X84-K4-u und N1-A-X168-K4-u).

Die Ergebnisse der Höchstzugkraftdehnung zeigten eine signifikantere Differenzierung der Proben untereinander im Gegensatz zur Höchstzugkraft, jedoch können nicht alle Ergebnisse logisch erklärt werden. Für das neue Gewebe N1 wurde eine Höchstzugkraftdehnung von 13,7 % ermittelt.
Der größte Verlust der Dehnung ist an den während der klimatischen Alterung aufgespannten Geweben entstanden. Die Höchstzugkraftdehnung des Gewebes, welches 10 Wochen gespannt im Klimaschrank zyklisch schwankender Feuchte und erhöhter Temperatur ausgesetzt war (N1-A-K10-g), betrug nur noch rund 5 %, was einer Abnahme von rund 60 % entspricht. Auch bei den Geweben, die einer vier wöchige Alterung im Klimaschrank unterzogen wurden, ist ein deutlicher Unterschied (30 %) zwischen den gespannten und ungespannten Geweben zu erkennen. Die Aufspannung während der zyklisch schwankenden Feuchte lies die Höchstzugkraftdehnung insgesamt also deutlich abfallen. Damit wurden die Versuche von TOST bestätigt,

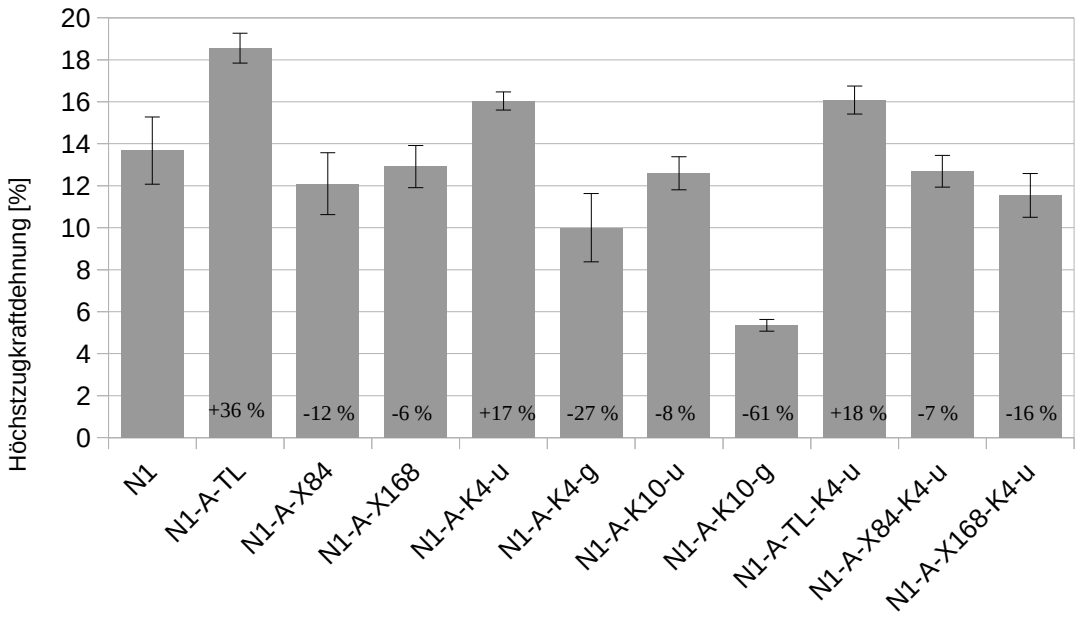


Abbildung 6.14: Höchstzugkraftdehnung [%] der künstlich gealterten Gewebe und ihre prozentuale Abnahme im Vergleich zum neuen Gewebe N1.
Mittelwerte aus 5 Messungen mit Standardabweichung.

die ebenfalls eine reduzierte Dehnbarkeit an Leinwänden feststellte, die während der Alterung aufgespannt waren.[753]
Bei den Proben N1-A-TL, N1-A-K4-u und N1-A-TL-K4-u lag die Höchstzugkraftdehnung deutlich über der des neuen Gewebes, was nicht logisch erklärt werden kann. Auch nicht logisch sind die Werte für die mit der Xenonbogenlampe belichteten Gewebe. Das weniger lang belichtete Gewebe (N1-A-X-84) lag deutlich unter dem länger belichteten Gewebe (N1-A-X168). Die Dauer und Intensität der Alterung war vermutlich nicht ausreichend, um signifikante Veränderungen der Höchstzugkraftdehnung im Gewebe zu bewirken.

Durchführung Nullzugfestigkeit an Garnabschnitten

Vor Durchführung der Zugprüfung wurden alle Garnabschnitte gewogen (Waage: Sartorius BP 211D). Die Ablesegenauigkeit erfolgte auf 0,01 mg genau. Die Feinheit *Tt* wurde nach Formel 5.15 (S. 189) bezogen auf die zugeschnittene Länge von 5 mm berechnet.
Zur Anwendung kam die Zugprüfmaschine ZO.5 TS (BT1-FR0.5TS.D14) der Firma Zwick (Ulm). Die Prüfung fand bei 23 °C und 50 %rF statt. Folgende Einstellungen wurden vorgenommen:
Einspannlänge: 0,1 mm
Anpressdruck der Klemmbacken: 6 bar
Prüfgeschwindigkeit: 0,1 mm/min
Vorkraft: keine
Gemessen wurden jeweils 12 Proben. Die Auswertung der Ergebnisse erfolgte nach Ausschluss des jeweils höchsten und niedrigsten Wertes. Aus den verbleibenden 10 Messergebnissen wurde der Mittelwert mit dazugehöriger Standardabweichung gebildet.

Ergebnisse

Die Ergebnisse sind sowohl als Höchstzugkraft F_H in cN, als auch als feinheitsbezogene Höchstzugkraft f_H in cN/tex angegeben. Alle hierfür aufgezeichneten Einzelwerte befinden sich im Anhang B.6.2, S. 357ff. Die Mittelwerte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft f_H in cN/tex sind in Abb. 6.15 zusammengefasst.
Die Genauigkeit der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft wird beeinflusst durch die Wägegenauigkeit zur Bestimmung der Garnfeinheit. Die größte Abweichung kann am Garnabschnitt mit der geringsten Masse von 0,00014 g (H-18-E1) entstehen. Die demnach theoretisch größte Abweichung für die f_H beträgt maximal 13 %
Der Kraftaufnehmer der Zugprüfmaschine ist oberhalb 2,5 N auf 0,5 % des Messwertes kalibriert. Für Ergebnisse unterhalb dieses Wertes gibt es keine Angaben des Herstellers über die

753 Siehe Kapitel 3.7.2 „Physikalische/Mechanische Einflüsse“ S. 134.

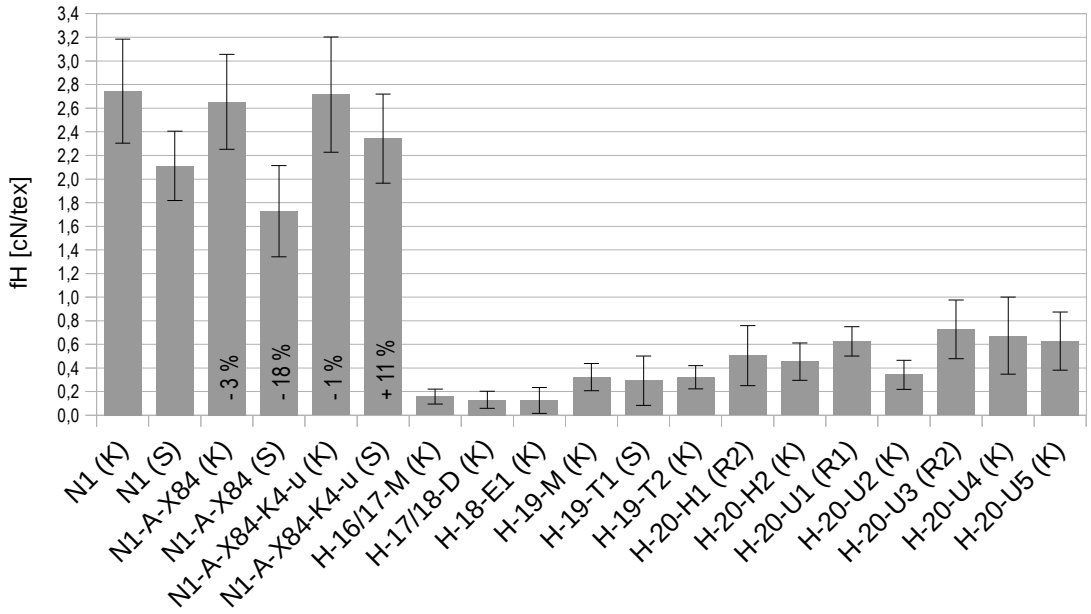


Abbildung 6.15: Mittelwerte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft fH [cN/tex] mit Standardabweichungen.
Die Prozentzahlen geben die Veränderung der künstlich gealterten Garne gegenüber dem ungealterten Garn N1 an.

Messgenauigkeiten. Die Messwerte der historischen Proben liegen unterhalb 2,5 N. Die Genauigkeit dieser niedrigen Messwerte kann daher nicht angegeben werden.

Die Ergebnisse aller Garnproben liegen zwischen 2,74 und 0,13 cN/tex (Abb. 6.15). Innerhalb der Ergebnisse ist ein deutlicher Unterschied zwischen den historischen Garnproben und den neuen, die künstlich gealtert wurden, zu erkennen.

Das neue Garn N1 zeigte höhere Werte für den Kettfaden als für den Schussfaden. Die im Xenotest für 84 h belichteten Proben, liegen mit der Festigkeit 3 bzw. 18 % (Kette bzw. Schuss) niedriger als die nicht gealterten Proben. Die im Anschluss 4 Wochen im Klimaschrank gealterten Proben, zeigten wiederum eine Erhöhung der Festigkeit, im Falle des Schussfadens um 26 %, sodass die Festigkeit oberhalb der des nicht gealterten Garns lag.
Auch Knecht beobachtete eine Erhöhung der Festigkeit von Schuss- und Kettfäden nach einer fünf wöchigen klimatischen Alterung mit schwankender Umgebungsfeuchte und erhöhter Temperatur. Sie nahmen um 17 bzw. 33 % zu.[754] Die von Knecht unter fast identischen Bedingungen durchgeführte Lichtalterung mit der Xenonbogenlampe erbrachte bei den Kettfäden eine Minderung der Festigkeit um 6 bzw. 22 %, was mit den Werten für N1-A-X84 vergleichbar ist. Die Schussfäden nahmen wiederum durch die Lichtalterung an Festigkeit zu.[755] Um die Zunahme der Festigkeit zu erklären, sind weiterführende Versuche nötig, die im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht durchgeführt werden konnten.

754 Knecht 2009, S. 49—50. Die Einspannlänge der Fäden wurde nicht genannt.
755 Knecht 2009, S. 41 und 109.

Auch Hackney/Hedley bestimmten an künstlich gealterten Garnproben die Nullzugfestigkeit. Ihre Ergebnisse sind in Tab. 6.8 angegeben. Um die angegebene Bruchkraft in g mit den hier ermittelten Ergebnissen vergleichen zu können, wurden die Ergebnisse der Nullzugfestigkeit dieser Arbeit umgerechnet. Die gemessene Höchstzugkraft F_H in N wurde durch den Wert der Erdbeschleunigung (9,81) dividiert. Die sich daraus ergebenen Werte für die künstlich gealterten Garne sind Tab. 6.9 zu entnehmen.

Die neuen Garne N1 zeigen deutlich niedrigere Bruchkräfte als das neue Garn von Hackney/Hedley. Die Lichtalterung durch Sonnenlicht hinter Fensterglas erbrachte eine vergleichbare Schwächung der Garne (-38,6 %) wie die hier durchgeführte Belichtung mit der Xenonbogenlampe für 84h (-34,6 %).

Tabelle 6.8: Ergebnisse der Nullzugfestigkeit an Flachsgarnen unterschiedlich gealtert aus Hackney/Hedley 1984, S. 84.2.19.

Prozentuale Angaben geben den Verlust gegenüber dem neuen Garn an.

	Neues Flachsgarn	4 Monate ca. 60 °C Dunkelheit	4 Monate ca. 60 °C mit Sonneneinstrahlung gefiltert durch Fensterglas
	3030 g	3030 g	1860 g (-38,6 %)
55 Tage 85 °C	1624 g (-46,4 %)	474 g (-84,4 %)	234 g (-92,3 %)

Tabelle 6.9: Ergebnisse der Nullzugfestigkeit: Umrechnung der Höchstzugkraft F_H [N] in die Bruchkraft [g].

Probenname	**F_H [N]**	**Bruchkraft [g]**	**Prozentuale Veränderung im Vergleich zum neuen Gewebe N1**
N1 (K)	6,47	660	
N1 (S)	4,8	489	
N1-A-X84 (K)	7,2	734	+ 11,28 %
N1-A-X84 (S)	3,14	320	- 34,58 %
N1-A-X84-K4-u (K)	6,55	668	+ 1,24 %
N1-A-X84-K4-u (S)	4,5	459	- 6,25 %

Die Werte der historischen Proben lagen um Größenordnungen unterhalb der neuen und künstlich gealterten Proben zwischen 0,126 und 0,727 cN/tex. Sie ordneten sich nur grob betrachtet nach ihrem Alter. So zeigten die Proben des 20. Jhs. tendentiell höhere Werte als ältere Proben. Ein prinzipieller und direkter Zusammenhang zwischen dem Alter der Proben und ihrer Festigkeit bestand jedoch nicht.

Die beiden Garnproben mit den niedrigsten Werten für f_H (H-17/18-D und H-18-E1) zeigten sich im Umgang als äußerst fragil und brüchig. Bei diesen beiden Proben stimmte das Messergebnis mit dem empirischen Eindruck über den Zustand des Bildträgers überein. Im Zusammenhang mit der oben erwähnten Umrechnung der ermittelten Höchstzugkraft F_H in die Bruchkraft lässt sich veranschaulichen, welch geringe Kräfte ausreichen, um die Garne zum

Reißen zu bringen. Ein Garn der Wandbespannung Ermlitz lies sich im Durchschnitt durch eine Kraft von 4,6 g zerreißen.[756]
Alle anderen Bildträger waren im Handling stabil und konnten dem empirischen Eindruck nach nicht untereinander differenziert werden. Demnach konnte ihr Zustand nicht mit den Messergebnissen in Zusammenhang gebracht werden.
Historisch und künstlich gealterte Flachsgarne wurden von EDWARDS et al. gemessen, jedoch mit einer Einspannlänge von 2,5 cm.[757] Die von EDWARDS et al. ermittelten Werte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft lagen für das historische Flachsgewebe (ehemaliges Segeltuch datiert 1805) im Mittel bei 5,1 cN/tex mit einer Standardabweichung von 2,5 cN/tex. Damit lagen sie deutlich oberhalb der im Rahmen dieser Arbeit erzielten Werte und zeigten eine ähnlich hohe Standardabweichung. Das zum Vergleich gemessene neue Flachsgarn lag mit 17,6 cN/tex deutlich höher als das neue Garn N1 (2,7 cN/tex). Die Unterschiede in der Einspannlänge können nicht für die Unterschiede der Ergebnisse beider Messungen verantwortlich sein, da eine höhere Einspannlänge in der Regel mit niedrigeren Messwerten einhergeht.[758]

Die Überprüfung der Messung der Nullzugfestigkeit ergab, dass sie prinzipiell auf historische Garnproben anwendbar ist. Die Voraussetzung ist, am Objekt eine gesamte Garnlänge von 60 mm zu entnehmen. Es ist jedoch zu beachten, dass die Prüfung von Garnproben, die am Spannrand entnommen wurden, nicht unbedingt den Verhältnissen des aufgespannten Bildträgers entsprechen. Für eine zukünftige Anwendung sollte die Sensibilität der Kraftmessdose der Zugprüfmaschine an die geringen Kräfte angepasst sein, um die Genauigkeit der Ergebnisse zu verbessern.

6.3 Bestimmung der Gleichgewichtsfeuchte

6.3.1 Sorptionsisothermen

Die Erstellung der Sorptionsisothermen erfolgte durch zwei unabhängige Messmethoden. Sie unterschieden sich prinzipiell als statische und dynamische Methode.[759] Der Großteil der Gewebeproben (neue, künstlich gealterte und gebleichte Gewebe) wurde durch die statische Methode im Klimaschrank erfasst. Die Messung der historischen Proben erforderte aufgrund

756 Die Werte der Bruchkraft für alle historischen Proben sind im Anhang B.6.2, Tab. B.9, S. 364 abgedruckt.
757 EDWARDS et al. 2006.
758 Vergleiche Kapitel 5.2.4 „Einfacher Zugversuch“ S. 185f.
759 Siehe hierzu auch Kapitel 5.3.1, S. 190f.

der geringen Probenmenge eine erhöhte Genauigkeit, die durch den Einsatz der dynamischen Methode (DVS) gewährleistet wurde.
Alle Isothermen wurden bei 25 °C erfasst. Weil ein vollständiges Trocknen der Gewebe vor der Erstellung der Sorptionsisotherme nicht sinnvoll erschien[760], wurde die Messreihe bei einer rF von 30 % begonnen. Die erste Gleichgewichtsfeuchte, die für die Sorption gemessen wurde, lag bei 40 %rF, dadurch wurde der Bereich der Isotherme zwischen 0 und 40 %rF nicht erfasst. Für die Sorption wurden folgenden Feuchtestufen gewählt: 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 95 %rF. Die Desorption erfolgte im direkten Anschluss mit den Feuchtestufen bei 90, 80, 70, 60, 50, 40, 30 %rF.
Die Auswertung erfolgte durch die Berechnung des Feuchtezuschlags *u* in %.

$$u = \frac{m_f - m_{tr}}{m_{tr}} \tag{6.4}$$

m_f = Masse feucht, m_{tr} = Masse trocken.
Die für die Berechnung von *u* erforderliche Trockenmasse wurde nach Abschluss der Messungen durch eine vollständige Trocknung der Proben ermittelt.

Durchführung statische Methode im Klimaschrank

Die Vorgehensweise orientierte sich an den Vorschriften NORM DIN 66138 und NORM DIN EN ISO 12571. Angewandt wurde das Exsikkatorverfahren.
Dementsprechend wurden die Proben in geschlossenen Petrischalen (Polystyrol) eingewogen und in den Klimaschrank gebracht.[761] Die Schalen verblieben dort im geöffneten Zustand und wurden nur kurz vor der Wägung verschlossen. Hierfür wurden die Proben periodisch der Klimakammer entnommen. Die nächste Stufe der relativen Feuchte wurde eingestellt, wenn eine Massekonstanz erreicht wurde. Diese ist nach NORM DIN EN ISO 12571 erreicht, wenn die Änderung der Masse dreier aufeinanderfolgender Wägungen, die in mindestens 24 Stunden Abstand durchgeführt werden, weniger als 0,1 % der Gesamtmasse beträgt. Die Protokolle der aufgezeichneten Masseänderungen sind im Anhang aufgeführt.[762] Da 23 Gewebeproben parallel gemessen wurden, kam es in Einzelfällen zu einer Abweichung dieser Vorgabe. In der Regel wurde sie aber eingehalten. Die Massebestimmung erfolgte mit der Analysenwaage Mettler AE 166. Die Ablesbarkeit und Reproduzierbarkeit lag bei 0,1 mg, die Linearität bei ± 0,2 mg.

Die für die Berechnung des Feuchtezuschlags *u* benötigte Masse feucht m_f wurde die innerhalb einer Feuchtestufe zuletzt gemessene Masse gewählt, sofern sich die Masse kontinuierlich auf einen höchsten (Adsorption) bzw. niedrigsten (Desorption) Wert hinentwickelt hatte. Schwankte die Masse jedoch im Sinne eines dynamischen Gleichgewichts, wurde der Mittelwert dieser

760 Siehe hierzu auch Kapitel 5.3.1, S. 190f.
761 Gerätedetails im Anhang B.7.1, S. 365.
762 Anhang B.7.1, S. 366ff.

letzten Messwerte berechnet. Welche Werte jeweils verwendet wurden geht aus den Protokollen im Anhang hervor.[763]
Die für die Berechnung von *u* erforderliche Trockenmasse wurde nach Abschluss der Messungen durch eine Trocknung bei 105 °C ermittelt.[764]
Um den Einfluss der Petrischale aus Polystyrol zu berücksichtigen wurden Sorptionsisothermen von 5 leeren Gefäßen erstellt. Stieg die rF von 65 % auf 95 % nahm eine Petrischale im Mittel 0,0016 g Wasserdampf auf. Die Menge Wasserdampf, welche von der Petrischale aufgenommen wird, wurde bei der Berechnung des Feuchtezuschlags der einzelnen Gewebe abgezogen.
Von jedem Gewebe wurde je nach Verfügbarkeit des Ausgangsmaterials zwischen 0,5 und 1,25 g Gewebe für die Durchführung verwendet.

Ergebnisse statische Methode

Die Genauigkeit der Ergebnisse wurde beeinflusst von der Genauigkeit der Waage zur Bestimmung der Masse der Proben. Dadurch ergab sich eine Genauigkeit im Feuchtezuschlag von ± 0,01 %.
Die Sorptionsisothermen des neuen und der künstlich gealterten Gewebe, sowie der gebleichten Gewebe zeigen den typischen Verlauf einer S-förmigen Kurve analog der Sorptionsisotherme für Cellulose mit Hysterese (vrgl. Abb. 3.2, S. 39 und Abb. 6.16, S. 244).
Beim Vergleich der Gewebe untereinander zeigten sich die jeweils größten Unterschiede zwischen 70 und 95 %rF.

Tabelle 6.10: Feuchtezuschlag u [%] der künstlich gealterten Gewebe für Sorption bei 25°C statische Methode.

Relative Feuchte [%]	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**	**95**
N1	6,1	7,04	8,0	9,58	11,51	15,07	18,35
N1-A-TL	6,02	6,94	7,75	9,08	19,97	14,83	18,33
N1-A-X84	5,79	6,8	7,48	8,85	10,82	14,43	17,5
N1-A-X168	6,11	7,09	7,83	9,21	11,19	14,86	18,13
N1-A-K4-u	5,92	6,82	7,56	8,81	10,3	13,69	17,22
N1-A-K4-g	5,99	6,92	7,81	9,33	11,15	14,47	17,44
N1-A-K10-u	5,77	6,61	7,32	8,46	9,79	13,21	16,62
N1-A-K10-g	5,63	6,52	7,34	8,75	10,49	13,6	16,24
N1-A-TL-K4-u	5,71	6,61	7,31	8,42	9,78	13,34	16,9
N1-A-X84-K4-u	5,8	6,74	7,41	8,64	10,18	13,58	16,83
N1-A-X168-K4-u	5,68	6,63	7,62	9,08	10,8	13,88	16,71
N1-A-K105-u	5,67	6,59	7,44	8,83	10,83	14,41	17,83

763 Anhang B.7.1, S. 366ff. Dort als graue Felder unterlegt.
764 Die Ergebnisse der Trocknung und die Berechnung von m*tr* befindet sich im Anhang B.7.1, S. 372.

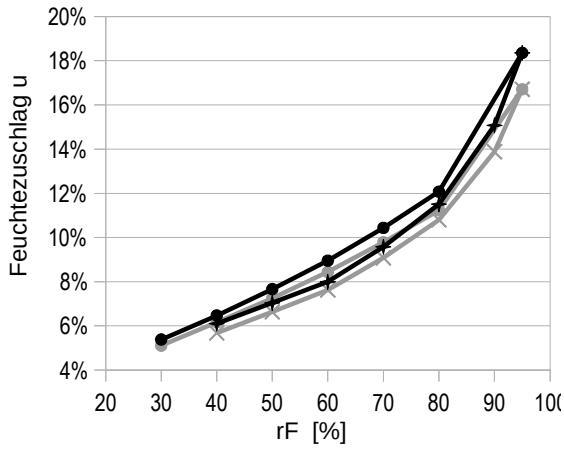


Abbildung 6.16: Sorptionsisothermen (25°C) des neuen und eines künstlich gealterten Gewebes der statischen Methode.
N1: schwarz, N1-A-X168-K4-u: grau. Sorption: Kreuz, Desorption: Punkt.

Das ungealterte Gewebe N1 zeigte im Vergleich zu den künstlich gealterten Geweben den höchsten Feuchtezuschlag mit 7,0 % bei 50 %rF, 8,0 % bei 60 %rF und 18,35 % bei 95 %rF. Die Unterschiede zu den künstlich gealterten Geweben waren teilweise gering, dennoch konnten eindeutige Differenzierungen vorgenommen werden.
Gering war der Unterschied zwischen ungealtertem (N1) und ausschließlich belichteten Geweben (Abb. 6.17), der bei N1-A-TL und N1-A-X168 meist um 0,1—0,3 % lag. Der größte Unterschied beider Gewebe zu N1 war 0,37 % (N1-A-X168) bzw. 0,54 % (N1-A-TL). Die geringste Feuchteaufnahme unter den belichteten Geweben wurde für N1-A-X84 gemessen. Bei einer rF von 95 % lag der Feuchtezuschlag um 0,85 % niedriger als bei N1. Die Dauer bzw. In-

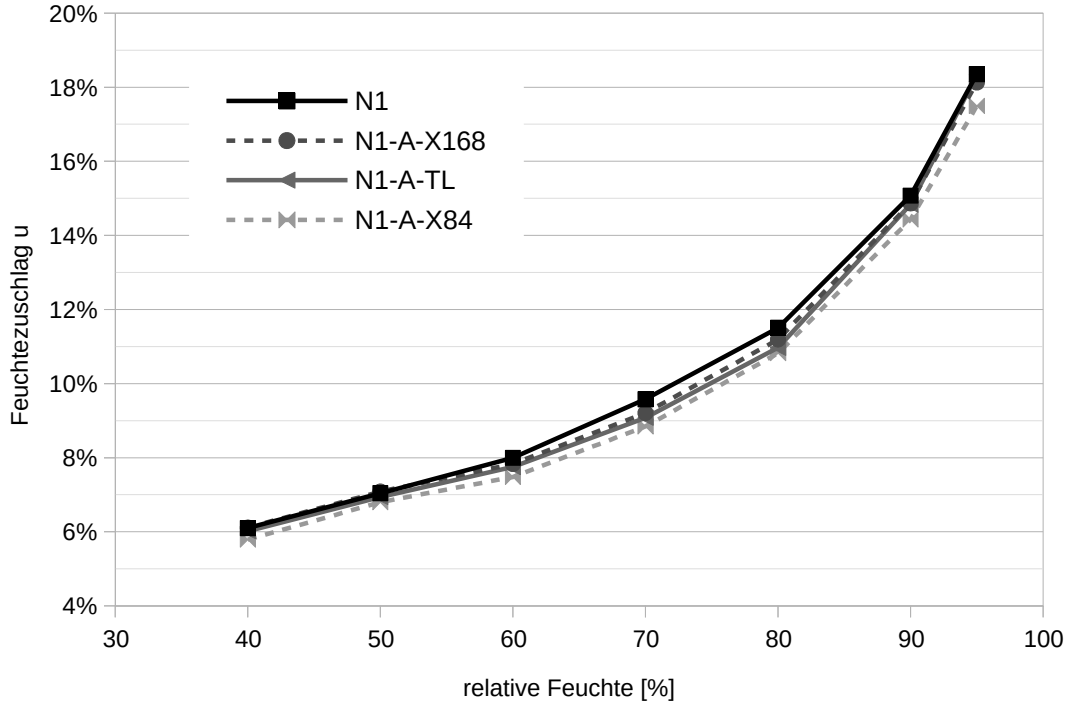


Abbildung 6.17: Adsorptionsisotherme (25 °C) des neuen Gewebes N1 und der belichteten Gewebe.

tensität der Belichtung konnte nicht mit der Menge der aufgenommenen Feuchte in Verbindung gebracht werden.
Das Gewebe, welches für vier Tage bei 105 °C getrocknet wurde (N1-A-K105-u), zeigte gegenüber dem nicht gealterten Gewebe N1 ebenfalls geringe Unterschiede in der Feuchteaufnahme und war mit dem Gewebe N1-A-X84 vergleichbar. Mit einen Feuchtezuschlag von 17,83 % bei 95 %rF bzw. 7,44 % bei 60 %rF lagen die Werte rund ½ % unterhalb des neuen Gewebes.

Alle Gewebe, die im Klimaschrank gealtert wurden, sowohl mit als auch ohne vorheriger Belichtung, zeigten einen niedrigeren Feuchtezuschlag als die nur belichteten Gewebe. Wobei das Gewebe, welches vier Wochen aufgespannt im Klimaschrank gealtert wurde (N1-A-K4-g) vergleichbar mit den belichteten Geweben war. Für eine bessere Vergleichbarkeit sind die Isothermen dieser Proben als Ausschnitt in Abb. 6.18 dargestellt.
Die geringste Feuchteaufnahme lag bei dem für zehn Wochen im Klimaschrank gealterten, ungespannten Gewebe vor (N1-A-K10-u). Vergleichbar niedrige Werte für den Feuchtezuschlag zeigte das Gewebe N1-A-TL-K4-u.
Die während der klimatischen Alterung aufgespannten Gewebe, nahmen mehr Feuchte auf, als die für die gleiche Zeit im Klimaschrank gealterten Gewebe, welche nicht gespannt waren (Abb. 6.19, S. 246). Mit der Dauer der klimatischen Alterung hat sich die Feuchteaufnahme der Gewebe reduziert, wie es der Vergleich der vier und zehn Wochen gealterten Gewebe zeigt (Abb. 6.19).

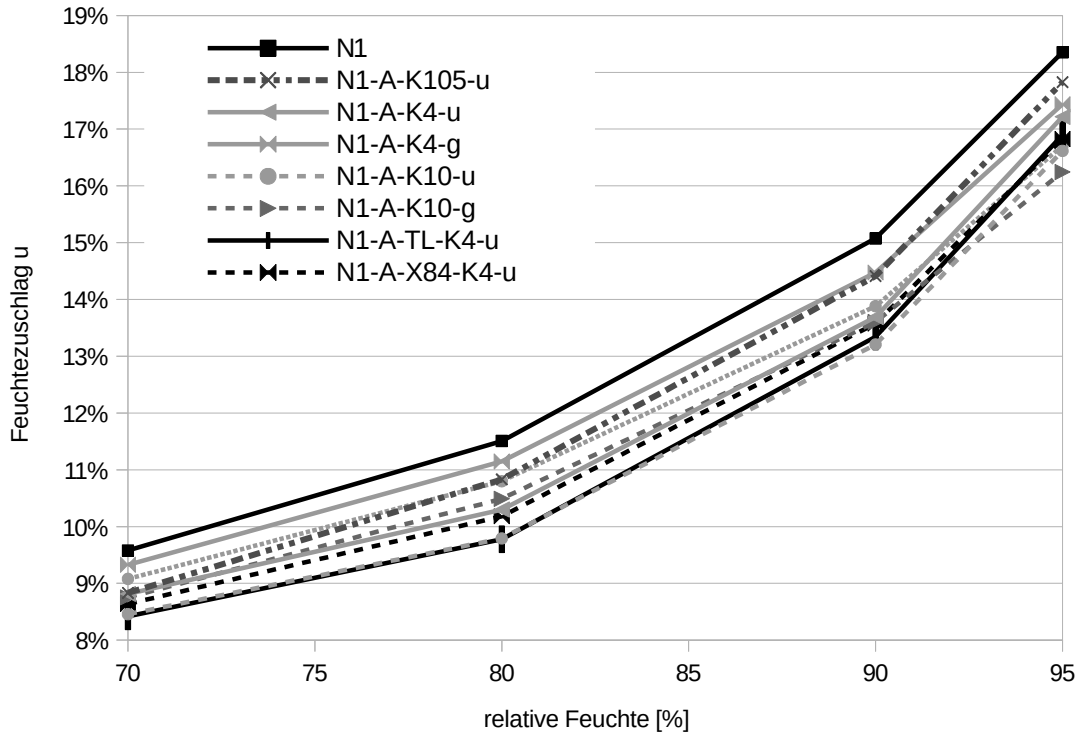


Abbildung 6.18: Ausschnitt der Adsorptionsisothermen (25 °C) künstlich gealterter Gewebe.

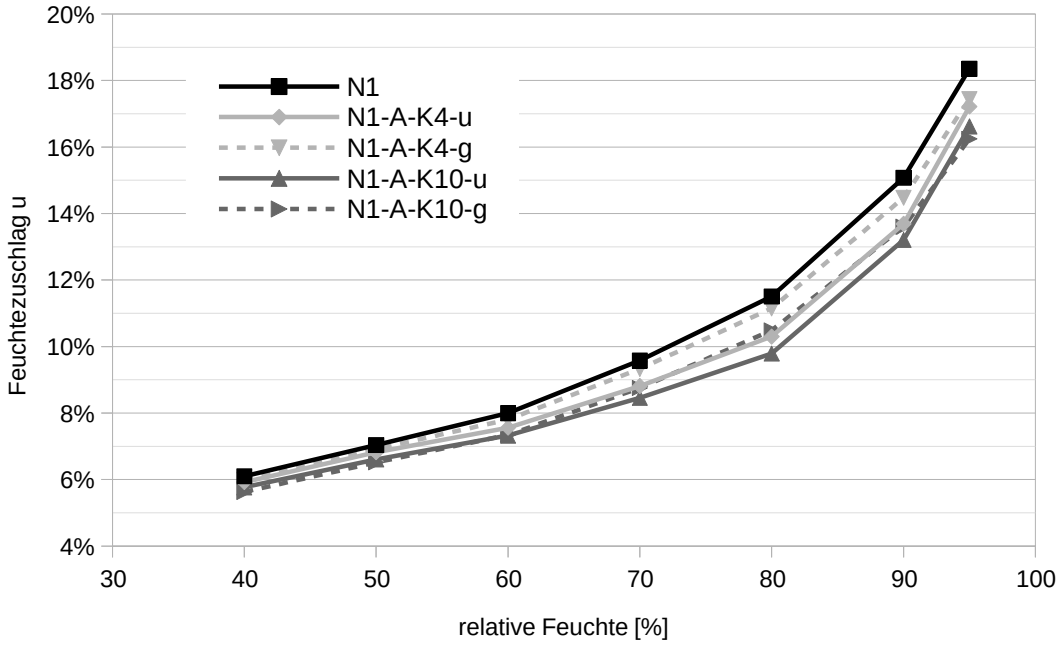


Abbildung 6.19: Adsorptionsisotherme (25 °C) der im Klimaschrank gealterten, gespannten (-K4-g und -K10-g) und nicht gespannten (-K4-u und K10-u) Gewebe.

Das Ausmaß der Hysterese ist in Abb. Fehler: Referenz nicht gefunden für die Gewebe der künstlichen Alterung dargestellt. Der Vergleich zeigt, dass die gespannten Gewebe einen geringeren Hysterese-Effekt zeigten als die gleichartig gealterten, jedoch ungespannten Gewebe. Die Hysterese-Kurven für die anderen Proben überschneiden sich, sodass keine einheitliche Reihenfolge über den gesamten Bereich der rF erstellt werden kann. Für den Bereich zwischen 60 und 80 %rF hat das Gewebe N1-A-X168-K4-u die geringste Hysterese, zwischen 40 und 70 %rF hat das Gewebe N1-A-K105-u die am stärksten ausgeprägteste Hysterese.

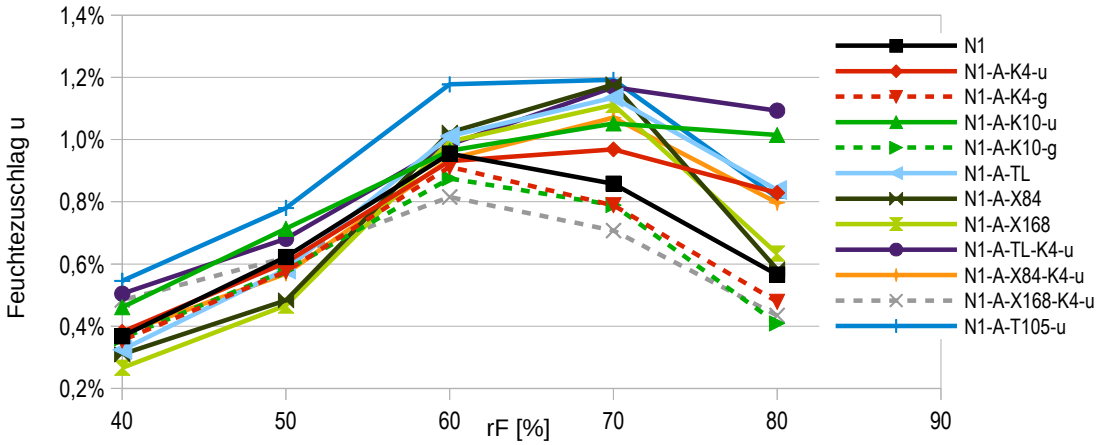


Abbildung 6.20: Darstellung der Hysterese: Differenz zwischen Feuchtezuschlag von Sorption und Desorption der künstlich gealterten Gewebe.

Alle gebleichten Gewebe nahmen weniger Feuchte auf, als die ungebleichten Gewebe (Tab. 6.11). Bei 95 %rF lag der Feuchtezuschlag der neuen, ungebleichten Gewebe zwischen 18,5 und 19,3 %, während die durch Bleichmethode 1 (B1) gebleichten Gewebe mit Feuchtezuschlägen zwischen 16,3 und 17 % zwischen 2,9 und 1,8 % niedriger lagen.[765] Beim Gewebe N3-B2 (Bleichmethode 2), welches bei der Rasenbleiche nicht mit Wasser, sondern mit Lauge befeuchtet wurde, war kaum Unterschied zum ungebleichten zu erkennen. Der Feuchtezuschlag lag nur in den niedrigen Bereichen der rF rund 0,5 % unterhalb des neuen Gewebes, oberhalb 70 %rF war der Unterschied mit 0,1–0,2 % sehr gering (Abb. 6.21, S. 248). Eine Erklärung dafür könnte die starke Quellwirkung einer Lauge auf Cellulose sein, wodurch mehr Feuchte gebunden werden kann.[766] Die Bleichmethode nimmt also Einfluss auf das Sorptionsverhalten der Gewebe.

Bei 60 %rF lag der Feuchtezuschlag der durch Bleichmethode 1 (B1) gebleichten Gewebe zwischen 6,6 und 7 %. Damit lagen sie zwischen 1 und 1,8 % niedriger gegenüber den ungebleichten Geweben. Die Ergebnisse sind vergleichbar mit den bisher publizierten Werten von Scheithauer und Kind. Sie stellten ein Absinken des Feuchtezuschlags durch das Bleichen zwischen 1 und 2 % fest. Vergleichbar ist ebenfalls der von Howlett angegebene Wert für einen Feuchtezuschlag gebleichter Gewebe von 7 % (25 °C/65 %rF).[767] Die Differenz zwischen Feuchtezuschlag der Sorption und Desorption wurde für die Bewertung der Hysterese gebildet und ist in Abb. 6.22 (S. 248) dargestellt. Darin ist zu erkennen, dass die gebleichten Gewebe im Bereich zwischen 60 und 80 %rF grundsätzlich eine höhere Hysterese aufwiesen, als die ungebleichten Gewebe.

Tabelle 6.11: Feuchtezuschlag u [%] von neuen und gebleichten Flachsgeweben für Sorption bei 25 °C statische Methode.

Relative Feuchte [%]	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**	**95**
N2	6,11	7,20	8,34	9,93	11,91	15,56	19,16
N2-B1	4,75	5,68	6,56	8,03	9,85	13,27	16,27
N3	5,80	6,83	7,85	9,43	11,39	15,10	18,56
N3-B1	5,18	6,09	6,86	8,35	10,21	13,70	16,71
N3-B2	5,29	6,35	7,40	9,14	11,23	15,22	18,42
N4	5,67	6,77	7,67	9,29	11,24	14,93	18,46
N4-B1	5,08	5,97	6,76	8,30	10,11	13,61	16,69
N5	5,96	7,06	8,13	9,79	11,83	15,55	19,29
N5-B1	5,12	6,08	6,96	8,45	10,34	13,75	16,98

765 Eine Übersicht über die Differenz der Feuchtezschläge befindet sich in Anhang B.7.1.
766 Siehe Kapitel 3.5.2 „Bleichen“ S. 81.
767 Siehe Kapitel 3.5.2 „Bleichen“ S. 80ff.

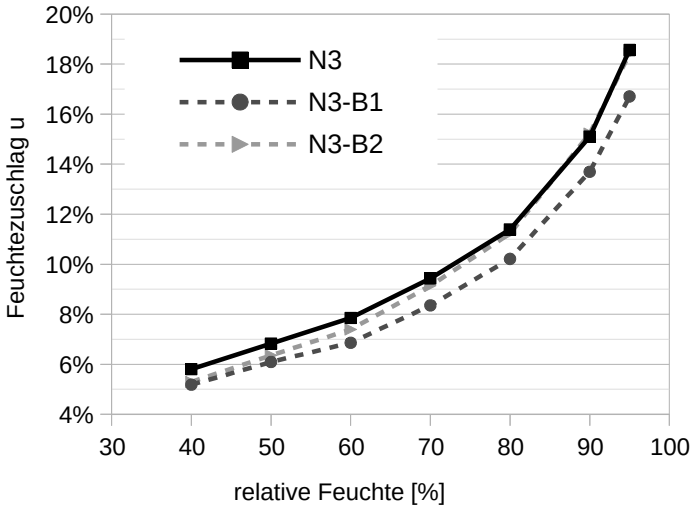


Abbildung 6.21: Adsorptionsisotherme (25 °C) des neuen Gewebes N3, in zwei Varianten des Bleichens (B1 und B2).

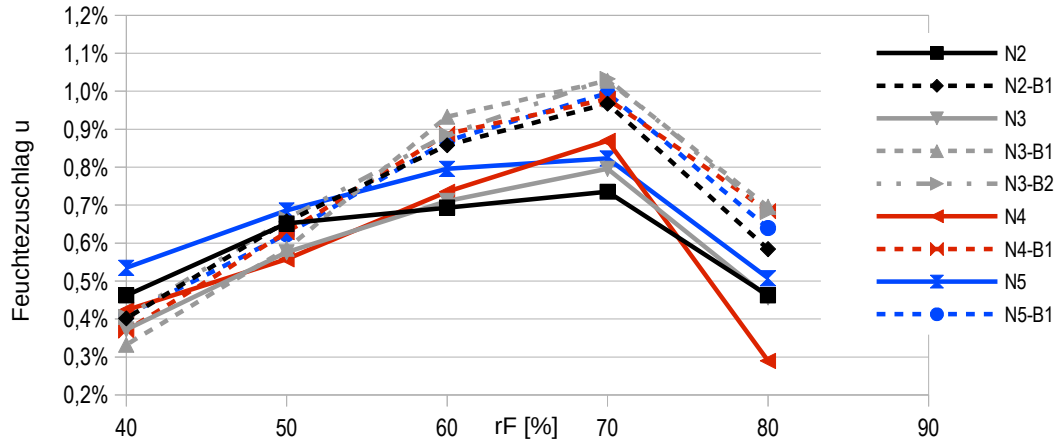


Abbildung 6.22: Darstellung der Hysterese: Differenz zwischen Feuchtezuschlag Sorption und Desorption der gebleichten Gewebe.

Durchführung dynamische Methode im DVS

Die Sorptionsisothermen der historischen Gewebe wurden an der TU Dresden, Institut für Lebensmittel- und Bioverfahrenstechnik, erstellt. Zur Anwendung kam das DVS-System (dynamic vapor sorption), wodurch die Messung vollautomatisiert durchgeführt wurde. Im Messgerät Q5000SA (TA Instruments) wurde durch die Mischung eines trockenen Stickstoffstroms mit gesättigtem Wasserdampf, Gasströme definierter relativer Feuchte bereitgestellt, welche die zu messenden Proben kontinuierlich umspülten. Die integrierte Waage maß mit einer Genauigkeit von < 0,1 µg.

Die nächste Feuchtestufe wurde eingestellt, sobald für die Dauer von 5 Minuten, die Masseänderung kleiner als 0,01 % der Probenmasse war.

Die für die Bestimmung des Feuchtezuschlags u (Formel 6.4, S. 242) erforderliche Trocknung der Proben (m_{tr}) wurde nach Abschluss der Erfassung der Isothermen im vollständig trockenem Stickstoffstrom durchgeführt. Gegenüber der statischen Methode wurden in diesem Zusammenhang bei der Desorption zusätzlich die Feuchtestufen 20 und 10 %rF erfasst, sodass für die Desorption der vollständige Verlauf von 95 bis 0 %rF aufgezeichnet wurde. Die Gleichgewichtsfeuchte für die vollständige Trocknung bei 0 %rF galt als erreicht, sobald die Masseänderung für die Dauer von 5 Minuten kleiner als 0,001 % der Probenmasse war. Für m_f wurde jeweils der Mittelwert aus den letzten 12 gewogenen Massen gebildet, weil die Massen gegen Ende der jeweiligen Feuchtestufe im Sinne des dynamischen Gleichgewichtes schwankten.

Von allen Proben wurden zwei voneinander unabhängige Messungen an unterschiedlichen Gewebeabschnitten durchgeführt. Die jeweiligen Pobengewichte lagen zu Beginn der Messung zwischen 1,97 und 2,68 mg.

Folgende Proben wurden gemessen:

N1 und N1-A-X168-K4-u sowie die historischen Proben H-16/17-M, H-18-E1, H-19-M, H-19-T1, H-19-T2, H-20-H1 und H-20-H2.

Ergebnisse dynamische Methode

Alle aufgezeichneten Isothermen zeigen den typischen, erwarteten Verlauf mit Hysterese (exemplarisch Abb. 6.23, S. 250). Die Ergebnisse der gemessenen Massen und der daraus errechneten Feuchtezuschläge sind in Anhang B.7.2 (S. 380ff) abgedruckt. Für jede Probe lagen Ergebnisse aus zwei Bestimmungen vor. Die Feuchtezuschläge wurden gemittelt und sind in Tab. 6.12 (S. 250) angegeben. Insgesamt lagen die Werte der Sorption zwischen 3,7 und 16,66 %. Bei einer rF von 50 % lagen alle Proben zwischen 4,9 und 5,8 %. Das neue Gewebe N1 lag mit 5,32 % im Mittelfeld.

Die ermittelten Werte des Feuchtezuschlags der historischen Proben bei 90 %rF lagen zwischen 11,17 und 12,91 % und sind vergleichbar mit dem von Wyeth gemessenen Wert von 13,1 % für eine Garnprobe des 17. Jhs.[768]

Die Werte der Desorption lagen aufgrund der Hysterese jeweils über jenen der Sorption. Die jeweilige Differenz ist in Tab. 6.13, S. 251 angegeben. Die Isothermen aller Proben sind in Abbildungen 6.24 (Desorption) und 6.25 (Sorption) abgebildet (S. 252, 253).

Die Proben sortierten sich hinsichtlich der Höhe des Feuchtezuschlags nicht nach ihrem Alter. Das neue Gewebe N1 lag zwischen den historischen Proben. Der niedrigste Feuchtezuschlag wurde für das künstlich gealterte Gewebe N1-A-X168-K4-u ermittelt. Das bestätigt die Abnahme des Feuchtezuschlags durch die künstliche Alterung, die bereits durch die statische Methode gezeigt wurde. Zur Veranschaulichung sind die Isothermen des neuen Gewebes N1 und

768 Vrgl. Tabelle 3.16, S. 136.

des künstlich gealterten Gewebes N1-A-X168-K4-u in Abb. 6.23 gegenübergestellt. Der Unterschied bei 50 %rF lag bei 0,33 % und für 95 %rF bei 2,5 % (vrgl. Tab. 6.12).

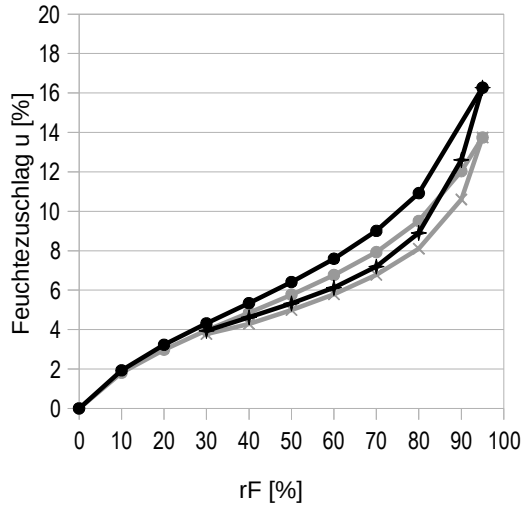


Abbildung 6.23: Sorptionsisotherme (25 °C) des neuen und eines künstlich gealterten Gewebes. Dynamische Methode DVS.
Sorption: Kreuz, Desorption: Punkt. N1: schwarz und N1-A-X168-K4-u: grau.

Tabelle 6.12: Aus zwei Bestimmungen gemittelter Feuchtezuschlag u [%] (25 °C) während Sorption.

Relative Feuchte [%]	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**	**95**
N1	3,94	4,62	5,32	6,12	7,19	8,90	12,60	16,27
N1-A-X168-K4-u	3,77	4,29	4,99	5,79	6,78	8,10	12,03	13,74
H-20-H1	4,20	4,84	5,47	6,32	7,35	9,17	12,91	16,66
H-20-H2	4,06	4,72	5,28	5,97	6,94	8,54	11,67	14,63
H-19-M	4,13	4,75	5,37	6,12	7,06	8,82	12,22	15,43
H-19-T1	4,33	5,07	5,73	6,37	7,24	8,97	12,65	16,03
H-19-T2	4,33	5,10	5,80	6,48	7,46	9,02	12,61	16,31
H-18-E1	3,79	4,38	4,99	5,66	6,65	8,23	11,17	13,86
H-16/17-M	3,90	4,39	4,90	5,65	7,04	9,09	12,35	15,38

Tabelle 6.13: Darstellung der Hysterese: Differenz zwischen Feuchtezuschlag u [%] Desorption und Feuchtezuschlag Sorption.

Relative Feuchte [%]	**30**	**40**	**50**	**60**	**70**	**80**	**90**
N1	0,37	0,72	1,08	1,47	1,81	2,02	-
N1-A-X168-K4-u	0,19	0,56	0,78	0,98	1,15	1,40	1,44
H-20-H1	0,05	0,42	0,86	1,16	1,54	1,70	1,19
H-20-H2	0,00	0,33	0,77	1,20	1,55	1,78	1,33
H-19-M	0,05	0,43	0,83	1,21	1,62	1,65	1,09
H-19-T1	0,12	0,41	0,82	1,33	1,84	1,98	-
H-19-T2	0,15	0,44	0,82	1,32	1,72	2,04	-
H-18-E1	0,16	0,49	0,83	1,22	1,49	1,57	1,13
H-16/17-M	0,35	0,88	1,39	1,83	1,83	1,63	1,20

Der niedrigste Feuchtezuschlag innerhalb der historischen Proben wurde an der Probe der Wandbespannung Ermlitz (H-18-E1) gemessen. Die Werte waren vergleichbar mit dem künstlich gealterten Gewebe.

Bei den Sorptionsisothermen von N1, H-20-H1 und H-16/17-M fällt auf, dass die Steigung ihrer Kurven ab einer rF von 50 bzw. 60 % steiler wird (Abb. 6.25, S. 253). Ihre Feuchteaufnahme steigt in diesem Bereich schneller an, als bei den anderen Proben. Dadurch kommt es zu Überschneidungen der Kurven und einer anderen Abfolge hinsichtlich der Menge der aufgenommen Feuchte. So nimmt z. B. die Probe des Melanchthon-Porträts (H-16/17-M) bis zu einer rF von 60 % im Vergleich am wenigsten Feuchte auf, ab 80 %rF positioniert sie sich im Vergleich zu den anderen Proben eher im oberen Bereich. Im Falle der Desorption kommt es ebenfalls bei den eben genannten Proben N1 und H-20-H1 zu einer Überschneidung anderer Kurven (Abb. 6.24, S. 252).

Für den Sorptionsbereich zwischen 30 und 60 %rF nahmen die beiden Bildträgerproben der Adolf Thomas Gemälde (H-19-T1, H-19-T2) am meisten Feuchte auf, auch im deutlichen Abstand zum neuen Gewebe N1. Im oberen Bereich der rF nahmen die Proben des Hegenbarth-Gemäldes (H-20-H1), die beiden Bildträger der Adolf Thomas Gemälde und das neue Gewebe N1 am meisten Feuchte auf (vrgl. Abb. 6.25, S. 253). Dass die Bildträger der Adolf Thomas Gemälde so hohe Gleichgewichtsfeuchten aufweisen ist dahingehend interessant, dass diese Bildträger ausgewählt wurden, weil sie typische „Wasserschäden" am Bildträger zeigten.

Auch während der Desoption zeigte das künstlich gealterte Gewebe den geringsten Feuchtezuschlag (N1-A-X168-K4-u), mit geringem Abstand liegt darüber die Probe der Wandbespannung Ermlitz (H-18-E1). Die anderen Proben ordnen sich nach ansteigendem Feuchtezuschlag folgendermaßen: H-20-H2, H-19-M, H-1/18-M, N1 und H-20-H1, H-19-T1, H-19-T2. Diese Reihenfolge gilt bis zu einer rF von 90 %, oberhalb bei 95 %rF liegt die Probe H-20-H1 an der Stelle der höchsten Feuchteaufnahme (Abb. 6.24).

Die Hysterese war in der Regel zwischen 70 und 80 %rF am größten (Tab. 6.13, S. 251).

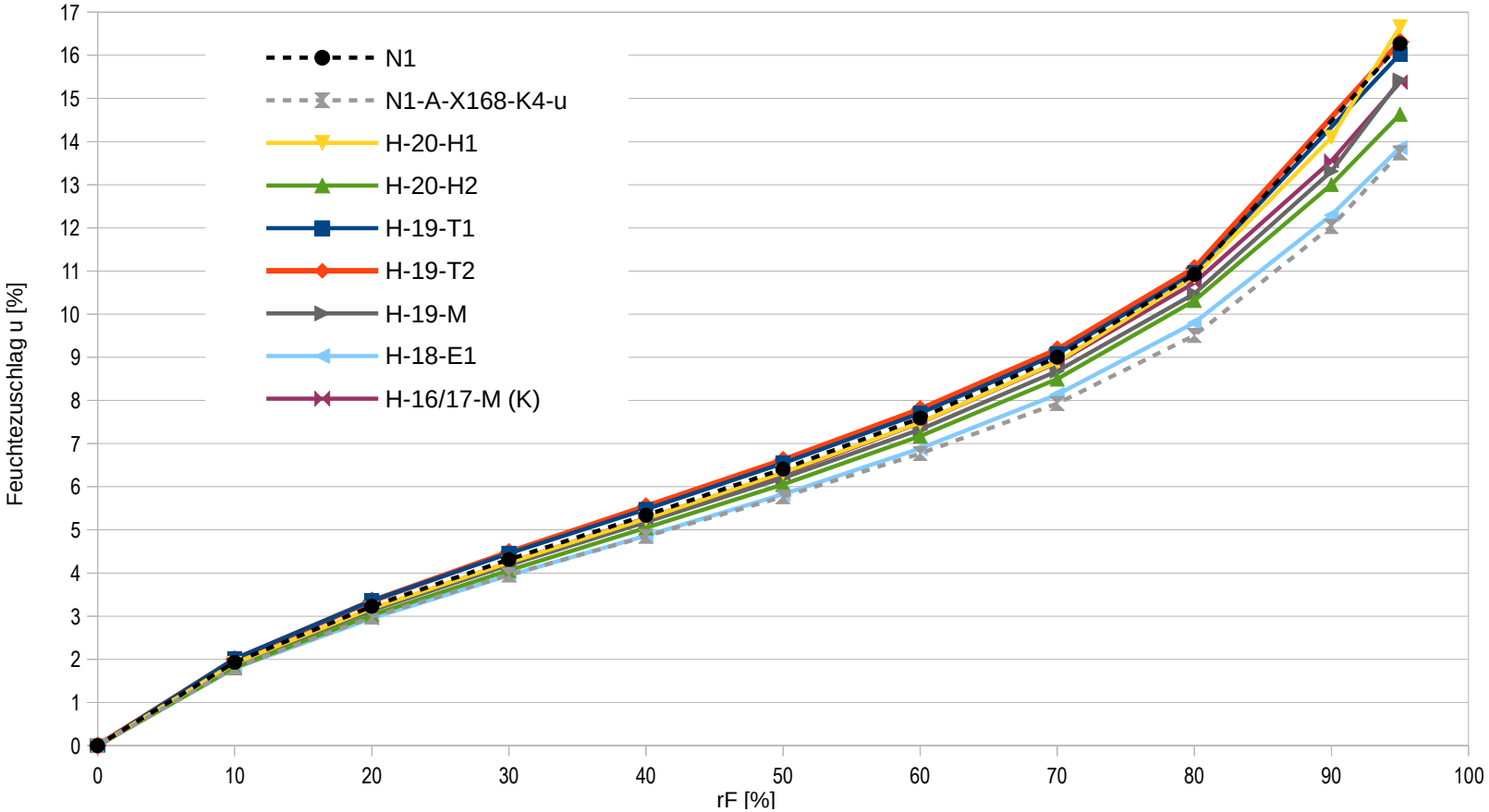


Abbildung 6.24: Desorptionsisothermen (25 °C) aller Proben der dynamischen Methode (DVS).

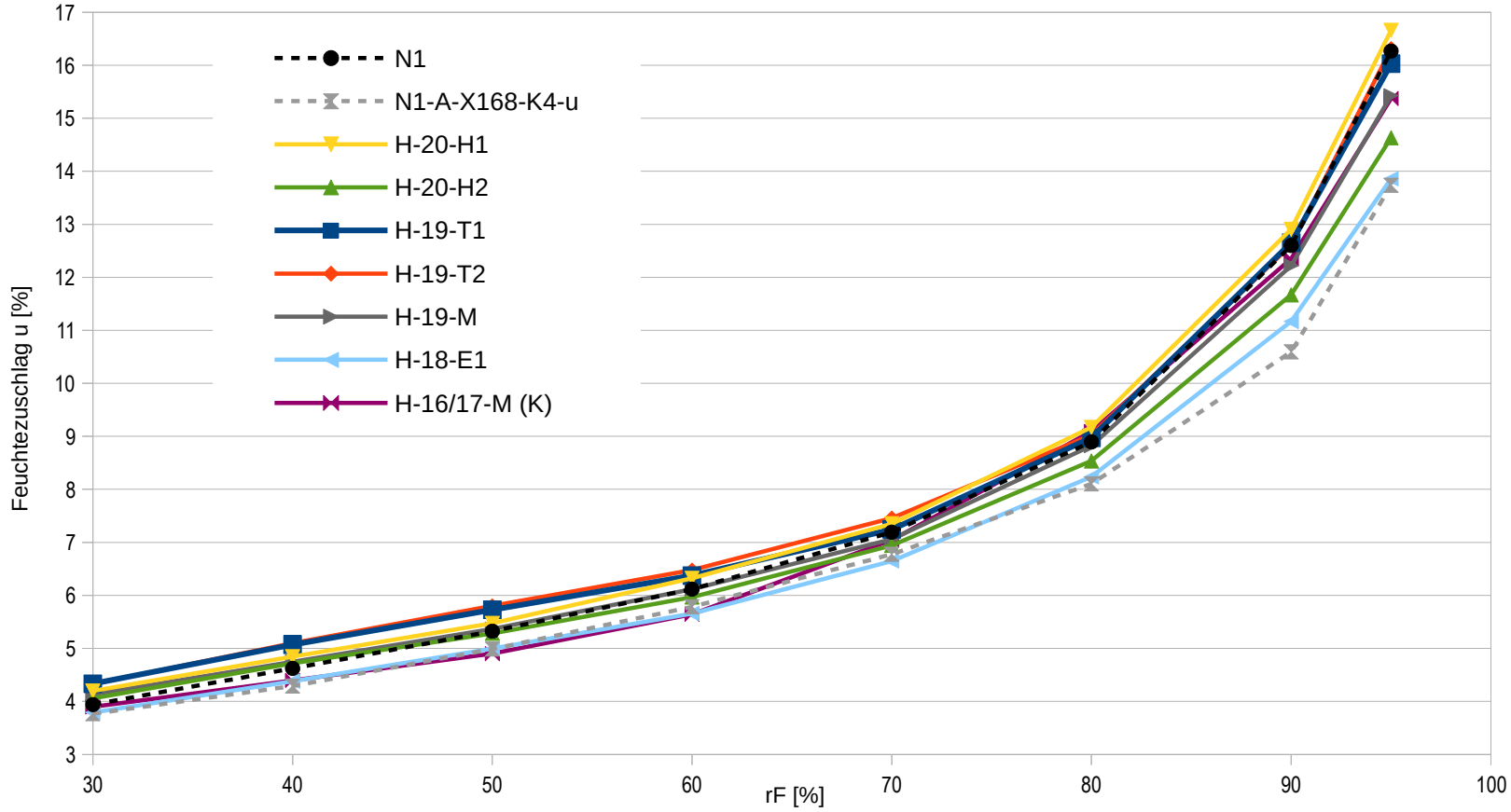


Abbildung 6.25: Sorptionsisotherme (25 °C) aller Proben der dynamischen Methode (DVS).

Mathematische Modellierung aller Isothermen mit dem GAB-Modell

Die mathematische Modellierung der Isothermen wurde mit dem GAB-Modell durch die Gleichung

$$X(rF)=\frac{X_m \cdot C_g \cdot K \cdot rF}{(1-K \cdot rF)\cdot(1-K \cdot rF+C_g \cdot K \cdot rF)} \tag{6.5}$$

vorgenommen, mit den in diesem Zusammenhang beschriebenen Konstanten X_m, C_g (>0) und K ($0 < K \leq 1$).[769] Die drei Konstanten wurden für jede gemessene Probe so gewählt, dass eine größtmögliche Übereinstimmung zwischen mathematischer Funktion und den Kurven aus den experimentell bestimmten Messwerten besteht. Die Parameter wurden mit Hilfe der Software Microsoft Excel bestimmt. Die Übereinstimmung beider Kurven wurde über das Bestimmtheitsmaß R^2 bewertet. Einbezogen wurden jeweils die Daten der Desorption. Die ermittelten Parameter sind zusammen mit dem Bestimmtheitsmaß in Tab. 6.14 und 6.15 zusammengefasst.

Tabelle 6.14: Ermittelte GAB-Konstanten für alle Proben der dynamischen Methode (DVS) für den Bereich 0—95 %rF Desorption.

(1) 1. Messung, (2) 2. Messung. Aus beiden Werten wurde der Mittelwert (MW) gebildet. Graue Zahlen bedeuten keine signifikante Unterscheidung der Werte innerhalb eine Spalte.

Probenname	X_m	MW	K	MW	C_g	MW	R^2
N1 (1)	0,0465	0,0467	0,7628	0,7627	8,0821	8,1194	0,9998229
N1 (2)	0,0469		0,7625		8,1568		0,9997810
N1-A-X168-K4-u (1)	0,0426	0,0426	0,7408	0,7395	8,8856	8,8036	0,9997686
N1-A-X168-K4-u (2)	0,0426		0,7382		8,7217		0,9997878
H-16/17-M (K) (1)	0,0491	0,0486	0,7341	0,7379	7,2798	7,3773	0,9999452
H-16/17-M (K) (2)	0,0480		0,7416		7,4747		0,9999179
H-18-E1 (K) (1)	0,0454	0,0451	0,7298	0,7289	7,6003	7,6358	0,9999552
H-18-E1 (K) (2)	0,0448		0,7279		7,6713		0,9999388
H-19-M (K) (1)	0,0468	0,0458	0,7359	0,7523	7,9295	8,1570	0,9998732
H-19-M (K) (2)	0,0448		0,7687		8,3846		0,9996873
H-19-T1 (S) (1)	0,0494	0,0480	0,7464	0,7502	8,3939	8,5443	0,9998193
H-19-T1 (S) (2)	0,0466		0,7540		8,6948		0,9997800
H-19-T2 (K) (1)	0,0485	0,0485	0,7540	0,7527	8,3323	8,3550	0,9996969
H-19-T2 (K) (2)	0,0484		0,7514		8,3777		0,9997386
H-20-H1 (R2) (1)	0,0432	0,0445	0,7802	0,7802	8,6059	8,6381	0,9997065
H-20-H1 (R2) (2)	0,457		0,7803		8,6704		0,9996601
H-20-H2 (K) (1)	0,0472	0,0472	0,7353	0,7331	7,2882	7,1715	0,9999420
H-20-H2 (K) (2)	0,0471		0,7308		7,0547		0,9999399

769 Siehe auch Kapitel 5.3.1 „Auswertung und Interpretation der Sorptionsisothermen“ S. 192ff.

Tabelle 6.15: Ermittelte GAB-Konstanten für Proben der statischen Methode für den Bereich 30—95 %rF Desorption.

Probenname	X_m	K	C_g	R^2
N1	0,0492	0,7733	21,5471	0,9992707
N1-A-K4-u	0,0445	0,7796	64,3325	0,9986395
N1-A-K4-g	0,0482	0,7641	23,8381	0,9992599
N1-A-K10-u	0,0434	0,7761	107,5822	0,9985424
N1-A-K10-g	0,0461	0,7568	21,9537	0,9991738
N1-A-TL	0,0467	0,7860	28,9765	0,9991184
N1-A-X84	0,0469	0,7736	20,0934	0,9990102
N1-A-X168	0,0607	0,7257	4,9383	0,9953296
N1-A-TL-K4-u	0,0432	0,7819	92,7693	0,9985448
N1-A-X84-K4-u	0,0447	0,7731	44,4815	0,9987498
N1-A-X168-K4-u	0,0475	0,7571	20,8593	0,9992473
N1-A-K105-u	0,0472	0,7768	19,7910	0,9991803
N2	0,0493	0,7844	21,5504	0,9991817
N2-B1	0,0430	0,7822	10,4121	0,9992295
N3	0,0466	0,7910	19,9146	0,9992117
N3-B1	0,0454	0,7771	12,6898	0,9994441
N3-B2	0,0499	0,7783	8,1830	0,9994747
N4	0,0450	0,7976	24,1429	0,9987259
N4-B1	0,0437	0,7828	12,7964	0,9993783
N5	0,0482	0,7916	23,0229	0,9992365
N5-B1	0,0447	0,7816	12,3348	0,9993474

Das Bestimmtheitsmaß zeigt, dass mit dem GAB-Modell eine zuverlässige Modellierung aller hier ermittelten Sorptionsisothermen mit hoher Übereinstimmung mit den experimentellen Daten möglich ist. Die Übereinstimmung beider Kurven ist exemplarisch in Abb. 6.26 zu sehen. Dadurch ist es möglich, für jede beliebige relative Feuchte den jeweiligen Feuchtezuschlag zu ermitteln.

Die meisten Parameter lagen alle sehr dicht beieinander. Um zu ermittelt, welche Werte sich signifikant voneinander unterscheiden, wurde eine statistische Analyse in Form einer einfaktoriellen Varianzanalyse (Anova) durchgeführt. Dies war nur für die Parameter der dynamischen Methode möglich, weil dort eine Doppelbestimmung der Proben vorlag. Die sich aufgrund dieser Analyse nicht signifikant voneinander unterscheidenden Ergebnisse sind in Tabelle 6.14 grau dargestellt.

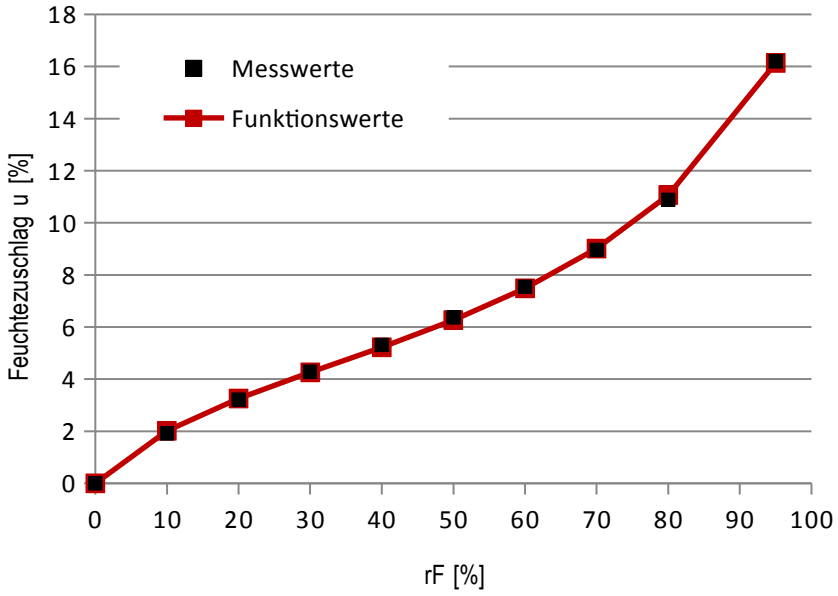


Abbildung 6.26: Vergleich der experimentell ermittelten Messwerte und der GAB-Isotherme.

Prinzipiell lagen die Werte aller Proben für $C_g > 1$ und $K < 1$. Wie in Tabelle 5.5 (S. 195) dargestellt, kann man daher davon ausgehen, dass die Wassermoleküle in allen Proben in den drei unterschiedlichen Bindungsformen vorlagen: Mono- und Multilayer sowie freies Wasser.

Parameter der dynamischen Methode

Bei den Modellparametern X_m und K lässt sich insgesamt wenig Differenzierung zwischen den Proben vornehmen. Die größten Unterschiede zeigen sich bei C_g (siehe Abbildungen 6.27, und 6.28).

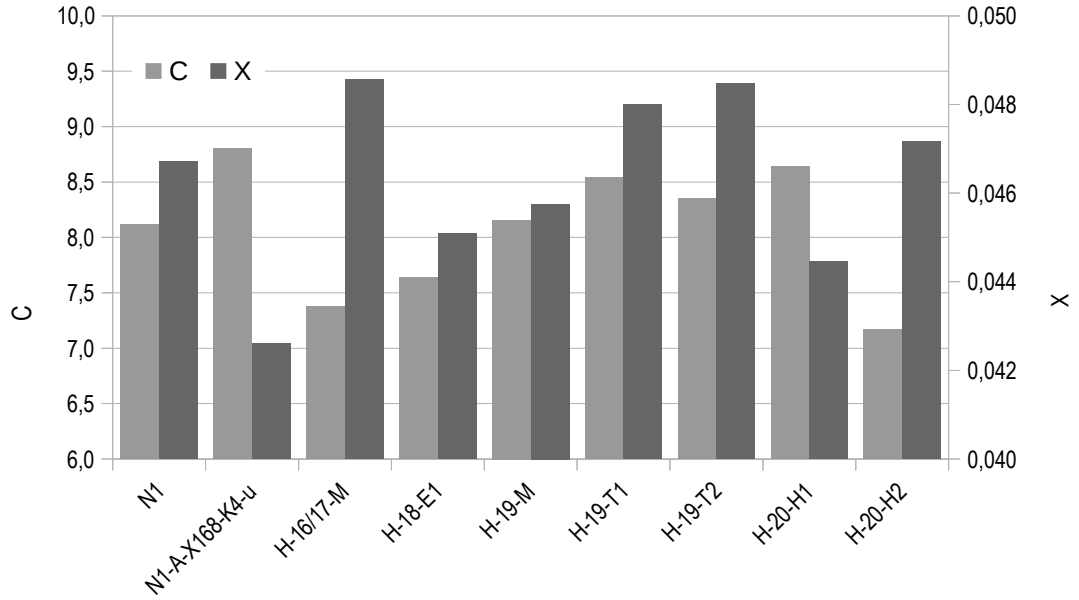


Abbildung 6.27: Modellparameter C und X der dynamischen Methode DVS.

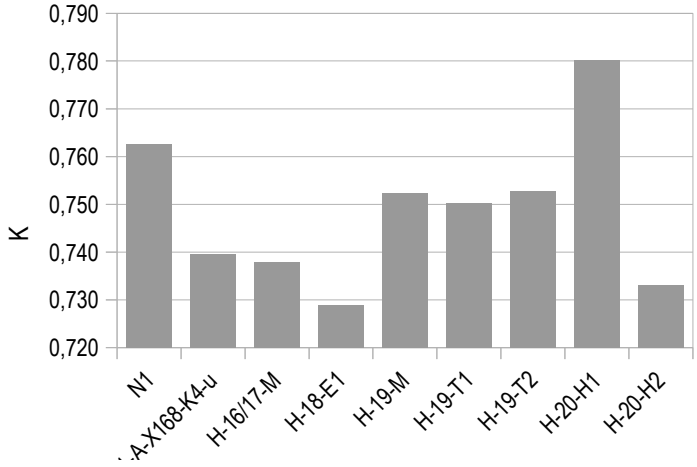


Abbildung 6.28: Modellparameter K der dynamischen Methode DVS.

Parameter *K* steht für die Bindungsenergie zwischen Multilayer und freiem Wasser. Der kleinste Wert gilt für die Probe H-18-E1. Im Vergleich zu den anderen Proben zeigt die Probe aus Ermlitz damit mehr Anteile der im Mulitlayer gebundenen Wassermoleküle und weniger freies Wasser. Das Mittelfeld bildet die Gruppe der untereinander gleichwertigen Proben (grau unterlegt in Tab. 6.14, S. 254) und den oberen Abschluss bilden N1 und H-20-H1, die dadurch im Vergleich zur Ermlitz-Probe mehr Anteile an freiem Wasser aufweisen.

Für X_m, welches für die Bindungsenergie der Wassermoleküle im Monolayer steht, lassen sich die Proben in folgende Reihenfolge nach aufsteigendem Wert bringen: N1-A-X168-K4-u, H-20-H1, H-18-E1, gefolgt von der Gruppe der sich nicht signifikant unterscheidenden Proben (grau unterlegt in Tab. 6.14), der höchste Wert gilt für H-16/17-M.

Der statistischen Analyse zufolge, lassen sich alle Proben der dynamischen Methode in Bezug auf C_g signifikant voneinander unterscheiden. Der Parameter C_g charakterisiert die Bindungsenergie der Wassermoleküle zwischen Mono- und Multilayer. Je größer dieser Wert ist, desto größer ist der Unterschied zwischen beiden Bindungsformen. Entweder sind dann die Wassermoleküle im Monolayer fester gebunden, oder die des Multilayers schwächer gebunden. Die Proben sortieren sich nach aufsteigendem Wert wie folgt: H-20-H2, H-16/17-M, H-18-E1, N1, H-19-M, H-19-T2, H-19-T1, H-20-H1, N1-A-X168-K4-u.

Stellt man Bezüge zwischen den Parametern C_g und X_m her, fallen zwei Zusammenhänge auf. Das künstlich gealterte Gewebe N1-A-X168-K4-u hat den größten Wert für C_g und den kleinsten Wert für X_m. In Bezug auf die erfolgte Alterung könnte man interpretieren, dass die Wassermoleküle bei dieser Probe besonders schwach im Monolayer gebunden sind, was mit der Veränderung des Materials auf molekularer und supramolekularer Ebene zu erklären ist. Dafür spricht, dass diese Probe auch die geringste Menge an Feuchte aufnimmt. Bei der Probe des Melanchthon-Porträts (H-16/17-M) sind die Verhältnisse genau umgekehrt: sie zeigt den größten Wert für X_m und den zweitkleinsten für C_g. Daraus wird in der Regel geschlussfolgert, dass die Wassermoleküle im Monolayer besonders fest gebunden sind (hoher Wert X_m). In den niedrigen Bereichen (30—60 %rF) nimmt diese Proben die geringste Menge an Feuchte auf.

Der niedrige Wert für C_g könnte in diesem Zusammenhang bedeuten, dass der Unterschied zwischen der Bindungsenergie Monolayer und Multilayer gering ist, d. h. die Wassermoleküle im Multilayer auch fest gebunden sind.

Insgesamt liessen sich keine allgemein gültigen Rückschlüsse auf Alter oder Zustand der Proben ziehen.

Parameter der statischen Methode

Für die Ergebnisse der künstlich gealterten Gewebe, die durch die statische Methode erfasst wurden, lassen sich jedoch durchaus Rückschlüsse zwischen den Modellparametern und der Alterung der Proben ziehen.
Für beide Parameter C_g und K ist der Trend zu erkennen, dass ihr Wert sowohl durch die Dauer und Intensität der Belichtung (mit und ohne klimatischer Alterung) als auch durch die Aufspannung während der klimatischen Alterung, abnimmt (Abb. 6.29 und 6.30). Gleichzeitig ist für die genannten Proben zu beobachten, dass der Parameter X_m zunimmt.

In Bezug auf die Parameter C_g und X_m lässt sich erkennen, dass bei den künstlich gealterten Proben eine Zunahme von X_m immer auch mit einer Abnahme von C_g einhergeht (Abb. 6.30). Daraus wird in der Regel geschlussfolgert, dass die Wassermoleküle im Monolayer besonders fest gebunden sind (hoher Wert X_m). Der niedrige Wert für C_g könnte in diesem Zusammenhang bedeuten, dass der Unterschied zwischen der Bindungsenergie Monolayer und Multilayer gering ist, d. h. die Wassermoleküle im Multilayer auch fest gebunden sind. Gleichzeitig zeigt für diese Proben die Verringerung von K an, dass die Anteile an freiem Wasser abnehmen.

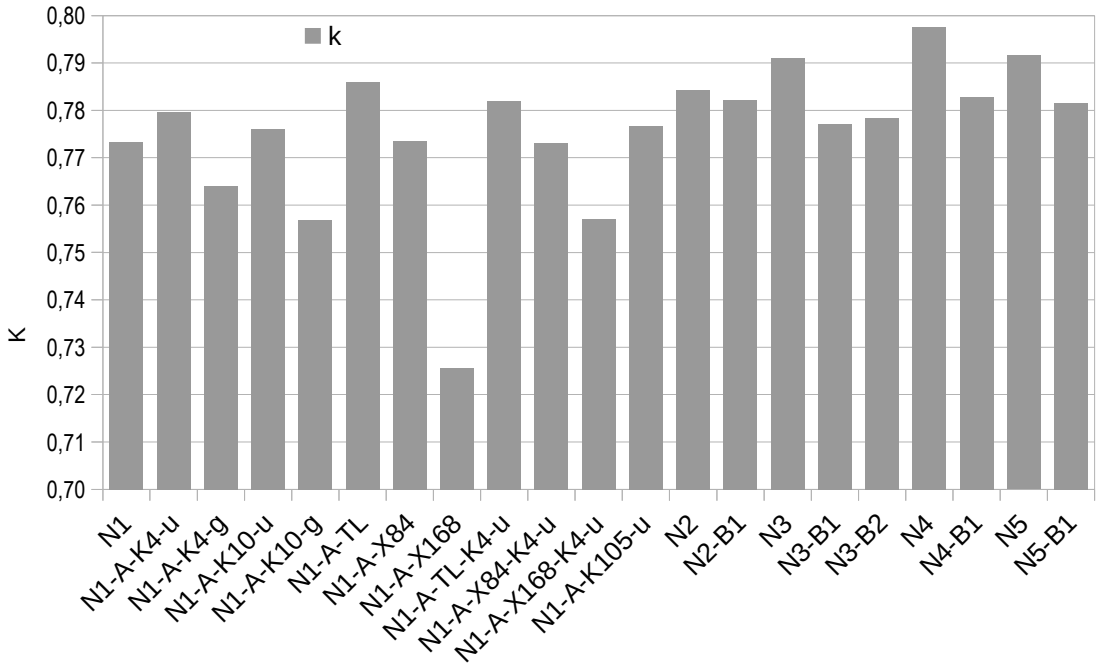


Abbildung 6.29: Modellparameter K der statischen Methode.

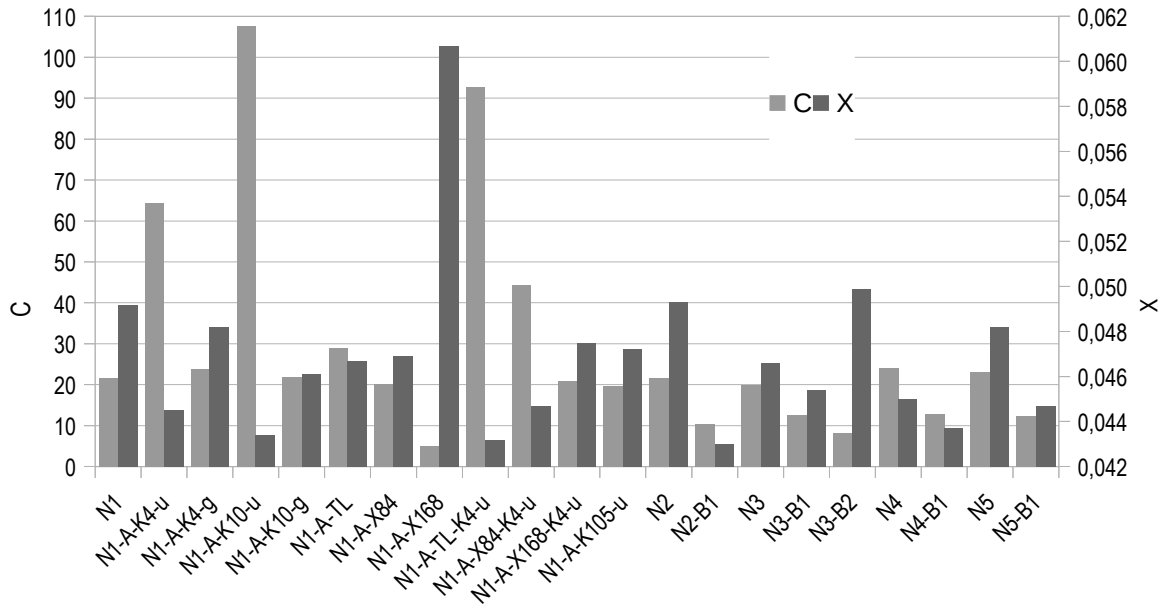


Abbildung 6.30: Modellparameter C_g und X_m der statischen Methode.

Die klimatische Alterung ohne Aufspannung schien keinen Einfluss auf *K* zu haben, auch die Proben, die durch eine Kombination von Licht und Klima gealtert wurden, waren vergleichbar mit jenen, die nur belichtet wurden. Dass die aufgespannten Gewebe insgesamt mehr Feuchte aufnehmen als die nicht gespannten Gewebe, lässt sich durch die Abnahme von *K* nicht auf die Anteile des freien Wassers beziehen. Man könnte interpretieren, dass die Wassermoleküle im Monolayer dafür verantwortlich sind, da der Wert von X_m für die gespannten Gewebe zunimmt. Dies trifft jedoch auch für die Dauer der Belichtung, was wiederum nicht mit einem steigenden Feuchtezuschlag einhergeht.

In Bezug auf die gebleichten Gewebe ist für beide Parameter C_g und *K* der Trend zu erkennen, dass ihr Wert durch das Bleichen abnimmt. Gleichzeitig ist zu beobachten, dass der Parameter *X* abnimmt. Dies gilt für alle Gewebe der Bleichmethode 1, das Gewebe welches durch Bleichmethode 2 gebleicht wurde, zeigt wiederum einen Anstieg für *X*. Offensichtlich sind bei den unterschiedlichen Bleichmethoden Veränderungen in der Bindungsstärke des Monolayers entstanden. Der Einsatz von Lauge während der Rasenbleiche lässt die Bindungsstärke im Monolayer steigen, was sich auch in einem höheren Feuchtezuschlag wiederfindet.

Insgesamt betrachtet, konnten vereinzelt Zusammenhänge zwischen den jeweiligen Modellparametern hergestellt werden. Der Bezug zwischen Modellparametern und Art der künstlichen Alterung bzw. Höhe der Feuchteaufnahme, konnte ebenfalls nur vereinzelt hergestellt werden. Eine umfassende Interpretation der Modellparameter, die auf alle Proben zutrifft, konnte jedoch nicht erfolgen. Dafür müssten mehr Daten vorliegen und es wäre empfehlenswert, die Erfassung der experimentellen Daten, also die Messung der Sorptionsisothermen, mit einer einheitlichen Methode durchzuführen. Die Modellierung von Sorptionsisothermen von

Flachs mit dem GAB-Modell ist bisher nicht publiziert worden, weshalb keine Vergleichsdaten vorliegen, was die Interpretation erschwert. Der Vergleich mit GAB-Parametern von Holz zeigt, dass die Werte in einem vergleichbaren Bereich liegen.[770]

Vergleich statische und dynamische Methode

Die Gewebe N1 und N1-A-X168-K4-u wurden sowohl durch die statische als auch die dynamische Methode erfasst. Ein Vergleich beider Bestimmungen kann anhand von Abb. 6.31 und 6.32 nachvollzogen werden. Daraus wird ersichtlich, dass durch die statiche Methode insgesamt höhere Feuchtezuschläge ermittelt wurden, was sich auch in den unterschiedlichen Modellparametern zeigt. Die Unterschiede sind erheblich und betragen bis zu 3 %. Zwei Ursachen können dafür verantwortlich sein. Zum einen wurden bei der statischen Methode Gewebe gemessen, im Gegensatz dazu wurde bei der dynamischen Methode nur ein sehr kurzer Garnabschnitt gemessen. Im Gewebe könnten also das Vorhandensein von mehr Zwischenräumen für die erhöhte Feuchteaufnahme verantwortlich sein. Da es jedoch unbekannt ist, wie hoch die Unterschiede der Gleichgewichtsfeuchte zwischen Garn und Gewebe sind, kann dieser Einfluss derzeit nicht verifiziert werden. Darüber hinaus unterschied sich die Methode, wie die Trockenmasse bestimmt wurde, auf der die Berechnung des Feuchtezuschlags basiert. An der HfBK (statische Methode) wurden die Gewebe bei 105 °C getrocknet, während es an der TU Dresden im DVS-System zu einer Trocknung der Proben im trockenen Stickstoffstrom kam. Sollte die Trocknung bei 105 °C zusätzlich Begleitsubstanzen aus dem Fasermaterial entfernen,

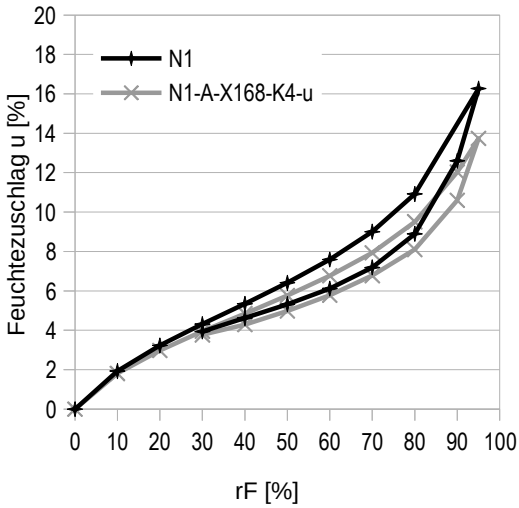


Abbildung 6.31: Sorptionsisotherme (25 °C) N1 und N1-A-X168-K4-u dynamische Methode TU Dresden.

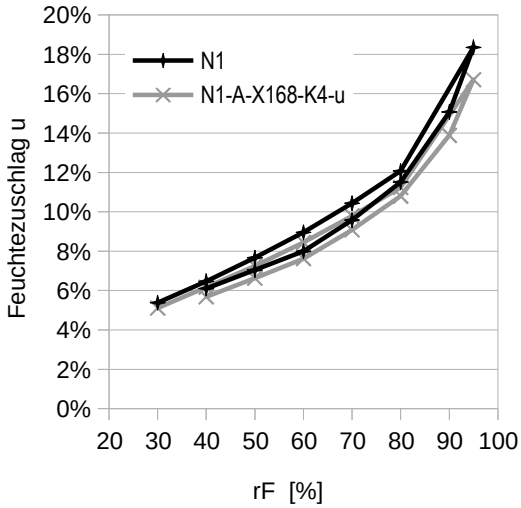


Abbildung 6.32: Sorptionsisotherme (25 °C) N1 und N1-A-X168-K4-u statische Methode HfBK Dresden.

770 Bratasz et al. 2012, S. 448.

würde das den höheren Feuchtezuschlag erklären, jedoch wäre es nicht in dieser Höhe zu erwarten.[771]
Die Differenz im Feuchtezuschlag zwischen dem neuen und dem gealterten Gewebe lag bei der dynamischen Methode bei 2,5 %, damit deutlich höher und signifikanter als bei der statischen Methode (Differenz von 1,6 %).

6.3.2 Bestimmung des Feuchtezuschlags mittels Nah-Infrarot-Spektroskopie

Vorgehen

Die durchgeführten Untersuchungen hatten zum Ziel, eine Vorgehensweise zu entwickeln, um von NIR-Spektren unbekannter Flachsgewebe auf deren Feuchtezuschlag schließen zu können. Dafür wurde an verschiedenen Geweben die Feuchtezuschläge ermittelt und den parallel dazu aufgezeichneten NIR-Spektren zugeordnet. Mit einem Teil der Messwerte wurde das NIR-Spektrometer angelernt bzw. kalibriert und mit einem anderen Teil der Messwerte getestet bzw. validiert. Die Ergebnisse dieser Entwicklung der Vorgehensweise wurden in einer Publikation zusammengefasst.[772]
Die vier Gewebe N1, N6, N7 und N8 wurden gleichartig vorkonditioniert und mit Hilfe eines Infrarottrockners Mettler Toledo LJ16 stufenweise getrocknet. Die Gewebe wurden so gewählt, dass die Anwendbarkeit der Methode auf Gewebe einer Faserart aber unterschiedlicher Geometrie überprüft werden konnte. Durch den während der Trocknung kontinuierlich ermittelten Masseverlust durch eine integrierte Waage war ein Rückschluss auf den Feuchtezuschlag möglich. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse zum Trocknungsverhalten der Gewebe wurden ebenfalls ausgewertet.
Das beschriebene Vorgehen wurde unter zwei verschiedenen Bedingungen durchgeführt: 18 °C/40 %rF sowie 23 °C/50 %rF (mit ± 0,5 °C und ± 2 %rF). Der Gleichgewichtszustand der Gewebe wurde durch mehrtätiges Auslegen im jeweiligen Klima durch Adsorption erreicht. Für jede Messung wurden unbenutzte Probenstücke der Größe 45 x 45 mm (N1 und N6) bzw. 60 x 60 mm (N7 und N8) verwendet.
Zunächst wurde durch vollständiges Trocknen der Gewebe bei 105 °C für 5 min der Feuchtezuschlag bestimmt. Die Temperatur von 105 °C wurde in Anlehnung an NORM DIN EN ISO 1833-1 gewählt. Eine Kontrollmessung mit einer Trocknungszeit von 30 min bestätigte die vollständige Trocknung, da kein weiterer Masseverlust auftrat. Aus jeweils 10 Messungen wurde der durchschnittliche Feuchtezuschlag u nach Formel 3.3 (S. 38) berechnet.

771 Siehe hierzu Kapitel 5.3.1, S. 190f.
772 von Reden et al. 2015.

Danach wurden alle vier Gewebe zusätzlich bei 105 °C in folgenden Zeitabstufungen getrocknet: 20, 40, 60, 80, 100, 120, 200 und 300 s. Der gleichzeitig aufgezeichnete Masseverlust diente zur Berechnung des verbleibenden Feuchtezuschlags. Das dafür von jeder Probe notwendige Trockengewicht wurde für jede Probe mit Hilfe des zuvor bestimmten durchschnittlichen Feuchtezuschlags errechnet.
Neben diesen Messungen wurde bei Gewebe N1 das Temperaturniveau des Infrarottrockners variiert (50, 60, 75, 90 und 105 °C). Diese Proben wurden jeweils 60 s und 300 s getrocknet. Auch für diese Gewebestücke wurde der Feuchtezuschlag berechnet.
Bereits bei der Vorbereitung wurden die Gewebe als heterogen eingeschätzt. Daher sollten zur Verbesserung der Ergebnisse mehrere Proben pro Messung untersucht werden. Da jede Probe nur einmal benutzt werden kann und möglichst viele Trocknungszeiten untersucht werden sollten, war eine erhebliche Menge an Probengewebe notwendig. Zunächst wurden daher drei Proben pro Gewebe und Trocknungszeit gemessen. Anschließend wurde der Mittelwert dieser drei Messungen und die Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert bestimmt. Der Wert der tolerierten Abweichung (Wert, dessen Überschreiten zu einer Wiederholungsmessung führt) wurde nach einer ersten Analyse der Daten so gewählt, dass signifikante Unterschiede in den Geweben sichtbar werden. Er liegt bei 0,3 %. Für jede Messung mit überschrittener Toleranz wurde eine zusätzliche Messung durchgeführt. Wegen der geringen Datendichte wurden keine Werte verworfen, der Mittelwert wurde jeweils aus allen Ergebnissen gebildet.
Unmittelbar nach der Trocknung wurde jedes Gewebestück manuell auf das nebenstehende NIR-Spektrometer (s. u.) transferiert und Spektren aufgezeichnet. Um zu vermeiden, dass die Gewebeproben während der Messungen Feuchte aus der Luft aufnehmen, wurden sie mit einem Backreflektor abgedeckt. Dieser besteht aus einem Gewicht mit definierter Reflexionsoberfläche (glasiertes Al_2O_3), ermöglicht eine glatte Messebene und verbessert zudem durch Transflexionsmessung (Mischform aus Transmission- und Reflexionsspektroskopie) das Signal-Rausch-Verhältnis. Die Anzahl der aufgezeichneten Spektren wurde zusätzlich auf 4 begrenzt, die innerhalb von 10 s an unterschiedlichen Positionen aufgezeichnet wurden. Alle vier Einzelspektren wurden in einem Mittelwertspektrum zusammengefasst, um Einflüsse aus der Heterogenität des Gewebes zu reduzieren.
Die gravimetrisch ermittelten Werte für die Feuchtezuschläge und die dazugehörigen NIR-Spektren bilden die Referenzdaten, mit der die chemometrischen Methoden angelernt wurden. Den gemessenen Spektren wurde der jeweilige Feuchtezuschlag zugeordnet. Im Gegensatz zu den Trocknungskurven wurden die Messungen hierfür nicht gemittelt. Der Grund ist die Heterogenität der Gewebe bei gleichzeitig kleinem NIR-Messfleck. Da es auch auf kleinen Gewebestücken signifikante Unterschiede der Spektrenintensitäten geben kann, wurden alle gemessenen Einzelwerte und die dazugehörigen Spektren verwendet.
Die 462 Spektren-Wertepaare wurden zuerst nach aufsteigendem Feuchtezuschlag sortiert. Danach wurden alle ungeraden Spektren-Wertepaare als Learnset und die geraden Spektren-Wertepaare als Testset zusammengefasst. Durch die vorherige Sortierung enthalten beide Sets eine

repräsentative Stichprobe. Mit Hilfe einer Software (KustaSpec) wird anhand der Spektren-Wertepaare des Learnsets eine chemometrische Methode angelernt. Hierfür kam die Partial Least Square Methode (PLS) zur Anwendung. Betrachtet wurde der Wellenlängenbereich zwischen 1100-2100 nm. Durch Anwendung der Methode auf die „unbekannten" Spektren im Testset werden von der Methode Ergebnisse (actual) geliefert, die mit den gemessenen Feuchtezuschläge (nominal) verglichen werden können. Der daraus berechnete Fehler dient der Validierung der angelernten Methode. Mit dem Testset wurde die Methode abschließend validiert.
Die Prognosegüte der entwickelten Methode wurde durch den Fehler des Testsets überprüft. Berechnet wurde der mittlere quadratische Vorhersagefehler (root mean squared error of prediction, RMSEP):

$$RMSEP=\sqrt{\frac{\sum (y_i-y_i)^2}{n}} \tag{6.6}$$

Zusätzlich wurde die Korrelation von vorhergesagtem Feuchtezuschlag zu tatsächlich gemessenem Feuchtezuschlag anhand der Regressionsgeraden betrachtet.
Für die Entwicklung der Methoden wurden die Spektren einem mathematischen preprocessing unterzogen, wozu u. a. die Normierung gehört.

Geräte

Infrarottrockner

Der Infrarottrockner Mettler Toledo LJ16 verfügt über eine Waage in einem abgeschlossenen Raum, in dessen Deckel eine Infrarotquelle Wärme erzeugt. Durch Einstellen von Temperatur und Zeit kann die Wärmezufuhr reguliert werden. Während die Infrarotquelle heizt, wird gleichzeitig der Masseverlust des Wägeguts abgelesen.
Die vollständige Trocknung über 5 Minuten zeigte bei den leichtesten Geweben einen mittleren Masseverlust von 38 mg bzw. 6,71 %. Bei dem Auflösevermögen der Waage von 1 mg beinhaltet das Ergebnis eine Wägeungenauigkeit von ± 0,2 %.
Um die Leistung und Genauigkeit und das daraus resultierende Trocknungsvermögen des Gerätes beurteilen zu können, wurde mit Hilfe von zwei Temperaturfühlern die Temperatur direkt auf der Gewebeoberfläche exemplarisch gemessen.
Für die Beurteilung der Genauigkeit des Gerätes und des daraus resultierenden Trocknungsvermögens der Gewebe gilt es zu beachten, dass der Trockner unabhängig von der eingestellten Temperatur in den ersten 60 s mit der gleichen Leistung arbeitet. Erst danach startet die Intervallheizung zur Steuerung der programmierten Temperatur. Die Aufheizrate betrug in dieser Phase ca. 39 °C/min. Das Gerät erwärmt sich kurzzeitig auf bis zu 25 °C über den eingestellten Wert und geht dann bedingt durch die Heizintervalle in einer Wellenfunktion über

(s. Abb. 6.33). Die Temperatur pendelt sich mit einer Abweichung von maximal ± 5 °C um den Sollwert ein.

NIR Spektrometer

Zur Anwendung kam das SurveNIR System. Es handelt sich um ein kompaktes Tischgerät, welches von der Firma Lichtblau e. K. als ein Werkzeug für die Zustandsanalyse für Papier entwickelt wurde und für die hier vorgestellten Versuche zur Verfügung stand. Es besteht aus einem Spektrometer, einem Computer und einer Software sowie den chemometrischen Methoden zur Auswertung der Spektren. Mit diesem Gerät können auch textile Bildträger gemessen werden (s. Abb. 6.34). Der Messpunkt des Spektrometers hat einen Durchmesser von 4,5 mm, die spektrale Auflösung beträgt 2 nm. Eine interne Kalibrierung vor jeder Messung stellt sicher, dass die Messungen unter den identischen gerätetechnischen Voraussetzungen durchgeführt werden.

Um die Visualisierung von Spektren mit unterschiedlicher Intensität in den Abbildungen zu verbessern, wird eine relative Darstellung der Spektren verwendet (Normierung der Remissionen (y-Achse) auf das Intervall [0,1] nach $x_{i,norm} = x_i - x_{i,min} / x_{i,max} - x_{i,min}$ mit $x_{i,norm}$= normierter Wert, x_i = Remission bei der Wellenlänge i, $x_{i,min}$ / $x_{i,max}$ = kleinste/größte gemessene Remission in einem Spektrum).

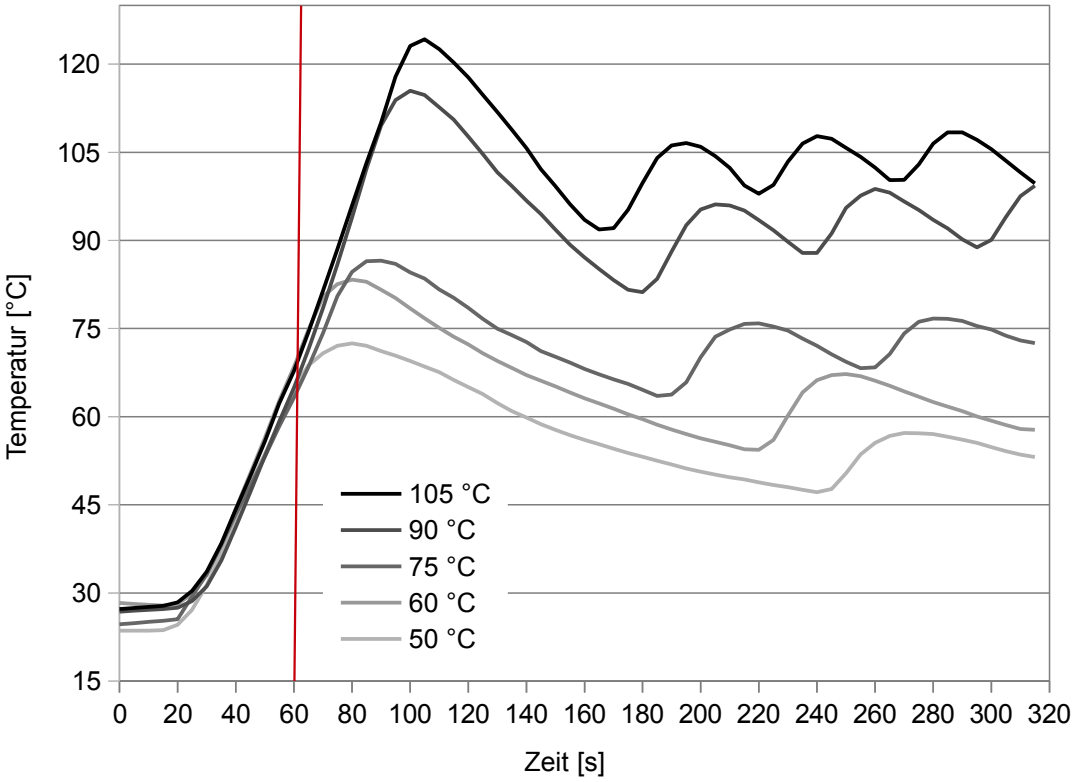


Abbildung 6.33: Temperaturentwicklung im Infrarottrockner auf der Oberfläche von Gewebe N1 für fünf programmierte Temperaturen.



Abbildung 6.34: Messung eines originalen Bildträgers mit dem SurveNIR System.
Fotografin: Stefanie Hentschel.

Ergebnisse

Feuchtezuschlag und Trocknungsverhalten der Gewebe

Durch vollständige Trocknung bei 105 °C für 5 Minuten wurde zunächst der Feuchtezuschlag aller Gewebe für die jeweilige Umgebungsbedingung bestimmt (Abb. 6.35). Sie liegen zwischen 7,14 % und 8,37 %.[773]

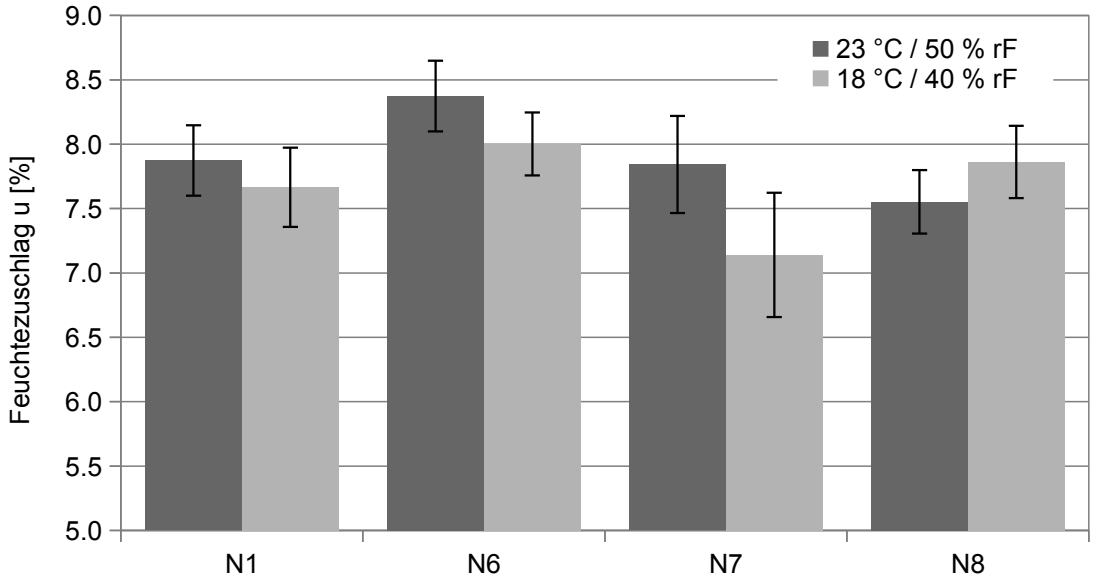


Abbildung 6.35: Gravimetrisch ermittelter Feuchtezuschlag aller vier Gewebe (Mittelwert mit Standardabweichung).

773 Alle Einzelmessungen sind in Anhang B.8, S. 387ff abgedruckt.

Die Schwankung in den Ergebnissen wird nicht auf das unregelmäßige Heizverhalten des Infrarottrockners zurück geführt, weil es sich um eine vollständige Trocknung handelte. Die naturgemäße Heterogenität der Flachsgewebe wird hier ausschlaggebend sein. Obwohl die Ergebnisse sehr dicht beieinander liegen ist für die Gewebe N1, N6 und N7 die Tendenz ablesbar, dass der Feuchtezuschlag im Umgebungsklima 23 °C / 50 %rF höher ist als bei 18 °C / 40 %rF. Dies trifft nicht für Gewebe N8 zu. Aufgrund der Beschränkung im Probenmaterial konnte diese Messreihe nicht wiederholt werden, um mögliche Ursachen zu klären. Wegen der eingeschränkten Datenlage zum Feuchtezuschlag von Flachsgeweben liegen keine direkten Vergleichsdaten für die hier eingesetzten Klimawerte vor. Die ermittelten Werte liegen jedoch innerhalb der Spanne von bisher publizierten Werten ähnlicher Klimawerte für Flachs unterschiedlicher Herkunft oder Verarbeitung.[774]

Die Abb. 6.36 stellt den Verlauf der Trocknung der Gewebe bei 105 °C dar. Mit einsetzender Trocknung (nach 20 s) verläuft sie für alle Gewebe zunächst annähernd linear (ca. 60—100 s) bis zu einem verbleibenden Feuchtezuschlag von ca. 0,5 % (für N1 und N7) bzw. 1,5 % (für N6 und N8). Im Anschluss findet eine asymptotische Annäherung an den Nullpunkt statt.

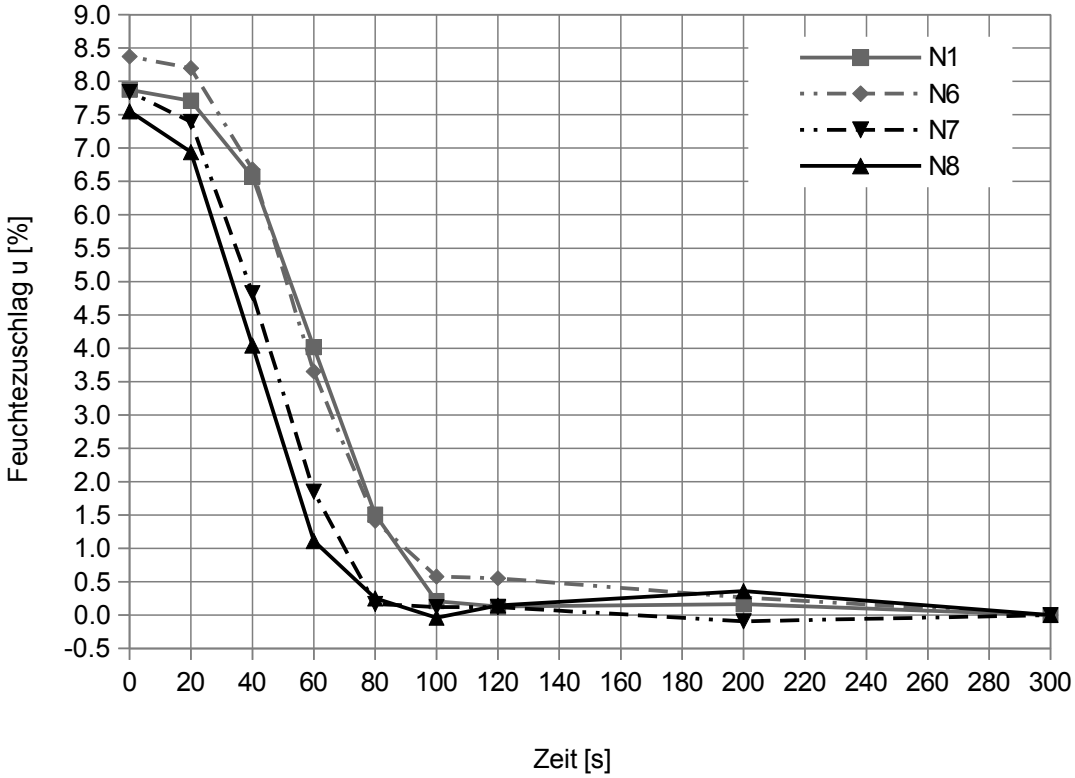


Abbildung 6.36: Trocknungskurve aller vier Gewebe: Feuchtezuschlag bei 23 °C/50 %rF während der Trocknung bei 105 °C.

774 Vrgl. Tabellen 3.10, 3.11 und 3.12, S. 72.

Die beiden dünnen Gewebe (N7 und N8) verlieren von Beginn an schneller ihre Feuchtigkeit als die beiden dickeren (N1, N6). Nach 60 s enthalten bei einer programmierten Trocknungstemperatur von 105 °C (tatsächliche Temperatur steigt in dieser Zeit nur bis 60 °C) Gewebe N1 und N6 noch ca. 50 % ihres ursprünglichen Feuchtezuschlags. Im Vergleich dazu enthalten Gewebe N7 und N8 nur noch ca. 24 % bzw. 15 % des ursprünglichen Feuchtezuschlags. Bei 105 °C sind alle Gewebe spätestens nach 200 s nahezu vollständig getrocknet.
Am Beispiel von Gewebe N1 werden in Abb. 6.37 die Werte für den Feuchtezuschlag *u* wiedergegeben, die sich durch niedrigere Temperaturen nach 300 s einstellen. Sie liegen zwischen ca. 0,45 % bei 90 °C und 2,4 % bei 50 °C (für 23 °C / 50 %rF). Die im Vergleich zur vollständigen Trocknung höhere Standardabweichungen lassen vermuten, dass hier das diskontinuierliche Heizverhalten des Infrarottrockners einen zusätzlichen Einfluss hat. Die hier ermittelten Werte liegen trotz deutlich kürzerer Trocknungzeit, unterhalb der von SCHEITHAUER ermittelten Werte des Feuchtezuschlags nach der Trocknung. SCHEITHAUER ermittelte einen Feuchtezuschlag von 5,1 % nach einer Trocknung bei 55 °C für 12 h und 2,64 % bei 80 °C für 3 h.[775] Da die genaue Methode der Trocknung von SCHEITHAUER nicht bekannt ist, können die Unterschiede nicht beurteilt werden, sie können in der Methode begründet liegen.

Die Beobachtungen während der Trocknung der Gewebe haben gezeigt, dass alle verwendeten Gewebe schon bei niedrigen Temperaturen innerhalb weniger Minuten weitgehend austrockneten. Schon bei einer Trocknungstemperatur von 60 °C waren innerhalb einer Minute mindestens 50 % des Feuchtezuschlags entwichen. Im Falle des dünnsten Gewebes blieben sogar nur

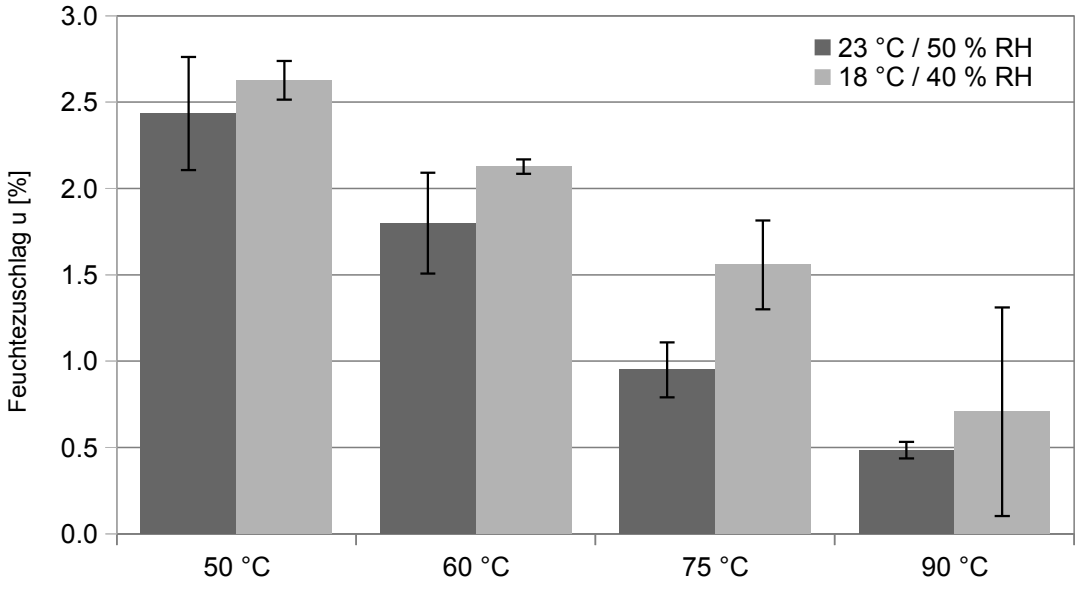


Abbildung 6.37: Feuchtezuschlag u von Gewebe N1 nach 300 s Trocknung bei verschiedenen Temperaturen (Mittelwerte mit Standardabweichung).

775 Siehe Anhang A, Tabelle A.8, S. 297.

noch 15 % der ursprünglichen Feuchte im Material, was einem Feuchtezuschlag von nur 1 % entspricht. Diese Beobachtungen sind für jede Form der Wärmezufuhr am Bildträger von Relevanz. Als Beispiel soll hier eine Doublierung eines Leinwandgemäldes mit dem Heisssiegelkleber BEVA® auf einem Heiztisch herangezogen werden. Um die Siegeltemperatur von 65 °C an entsprechender Stelle zu erreichen, wird der Heiztisch entsprechend höher programmiert. Eigene Messungen haben gezeigt, dass die Leinwandrückseite dabei schnell 75 °C erreicht. Bei einem Verbleib des Gemäldes von mehreren Minuten auf dem Heiztisch ist damit zu rechnen, dass der Bildträger nahezu vollständig austrocknet. Das Gewebe wird in Folge unflexibel und spröde. Vor dem Hintergrund der Theorie, dass eine solch starke Trocknung die Leinwand strukturell nachhaltig verändern kann und daraus eine verringerte Feuchteaufnahmefähigkeit resultiert, wird die Tragweite dieser Vorgehensweise deutlich.[776] Es besteht deshalb die Notwendigkeit, über die Materialfeuchte im textilen Bildträger – insbesondere bei Wärmebehandlungen - mehr fundierte Daten zu sammeln.

NIRS zur Bestimmung des Feuchtezuschlags

Das oben beschriebene Vorgehen der gravimetrischen Ermittlung des Feuchtezsuchlags und der anschließenden Aufzeichnung der Spektren konnte erfolgreich angewendet werden. In Abb. 6.38 ist zu sehen, dass sich die Spektren der Gewebe in Abhängigkeit der Trocknungszeiten verändern. Damit lässt sich aus den Spektren der Feuchtezuschlag ableiten. Die Kurven für die Trocknungszeit von 0 s und 20 s unterschieden sich kaum voneinander. Zugunsten einer klaren Darstellung wurde daher die Kurve für die 20 s dauernde Trocknung nicht dargestellt.

In Abb. 6.39 ist für den Feuchtezuschlag die Korrelation der durch die Methode vorhergesagten Werte (Actual) mit den tatsächlich gravimetrisch bestimmten Werten (Nominal) dargestellt. Bei einer exakten Übereinstimmung würde jeder Messpunkt auf der eingezeichneten Geraden liegen, das Bestimmtheitsmaß R^2 wäre dann 1,000. Die mit Hilfe des Learnsets kalibrierte Methode bestimmte für die dort enthaltenen Spektren-Wertepaare den Feuchtezuschlag mit einer sehr hohen Genauigkeit, wie das Bestimmtheitsmaß R^2=0,9851 zeigt. Auch für das Testset wurde mit R^2=0,9850 ein gleich gutes Bestimmtheitsmaß erreicht. Die sehr hohe Prognosegenauigkeit sowohl von Learn- als auch Testset spricht für die Robustheit der Methode. Dafür spricht auch der mittlere Fehler des Testsets (RMSEP) von 0,396 % Feuchtezuschlag.

776 Vrgl. Kapitel 3.2.1 „Supramolekulare Ebene“ S. 51.

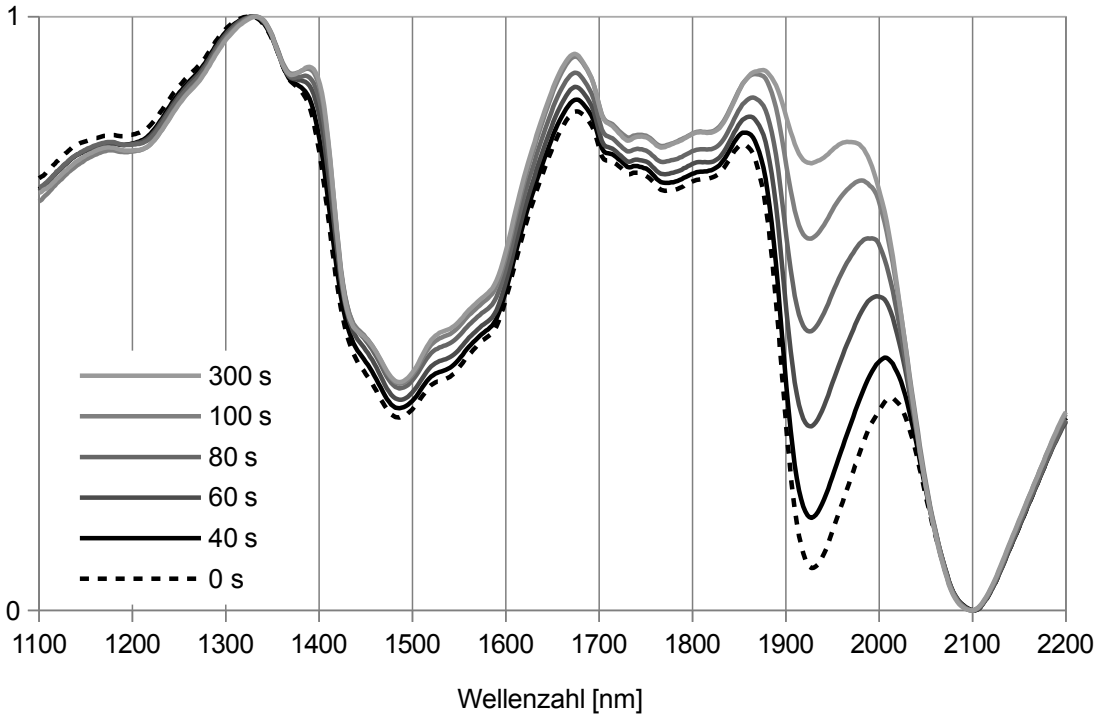


Abbildung 6.38: NIR-Spektren (normiert) von Gewebe N6. Durch die verschiedenen Trocknungszeiten bei 105 °C ergeben sich unterschiedliche Werte für den Feuchtezuschlag, welche sich im Spektrum widerspiegeln.

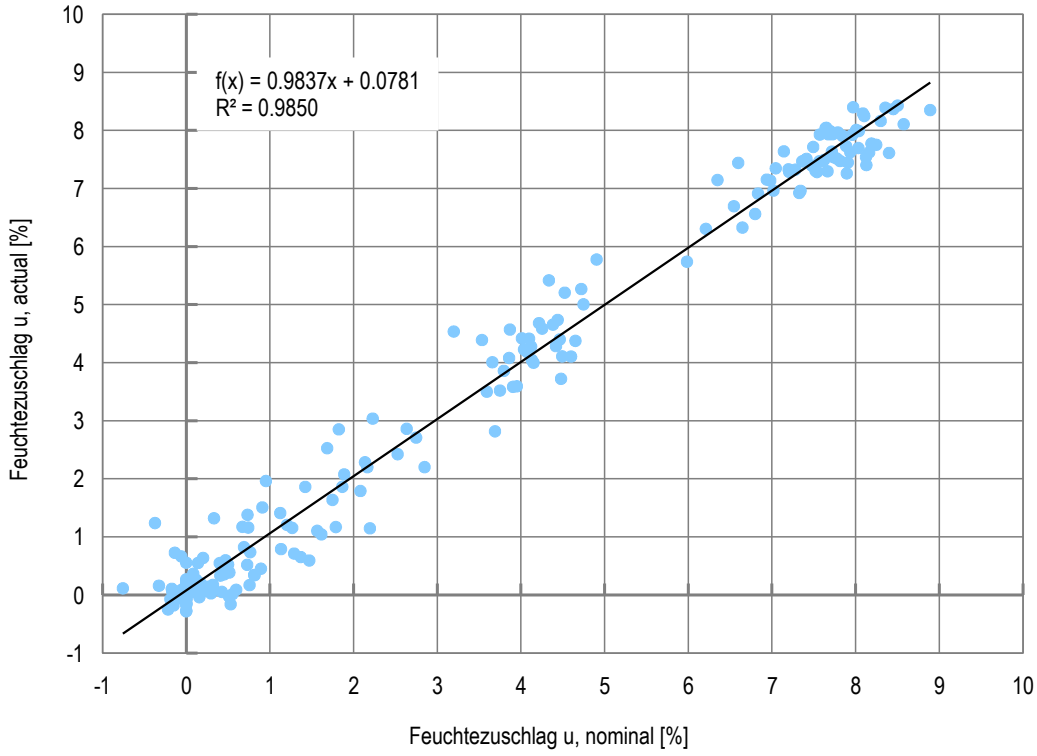


Abbildung 6.39: Validierung der Methode anhand des Testsets. Korrelation der von SurveNIR vorhergesagten (Actual) und tatsächlich gemessenen (Nominal) Werten für den Feuchtezuschlag.

Die auftretenden Abweichungen lassen sich durch zwei Aspekte erklären. Das manuelle Transferieren des Gewebes aus dem Trockner auf das nebenstehende Spektrometer ermöglicht es dem Gewebe trotz der kurzen Zeit, geringe Mengen Feuchte aus der Umgebung aufzunehmen. Darüber hinaus ist eine Ungenauigkeit eingeflossen, in Bezug auf die Berechnung des Feuchtezuschlags einer jeden Probe, die sich auf den Mittelwert des Feuchtezuschlags im jeweiligen Umgebungsklima bezieht.
Die hier vorgestellte, methodische Vorgehensweise und die daraus resultierenden Ergebnisse zeigen die Machbarkeit der Bestimmung des Feuchtezuschlags an Geweben mit NIR auf der Basis einer Datenbank mit verlässlichen Referenzwerten. Mit dem vorliegenden Datensatz ist eine zuverlässige Bestimmung des Feuchtezuschlags für die untersuchten und diesen ähnlichen, nicht degradierten Flachsgeweben zwischen 0 % und 8 % möglich.
Die Bestimmung eines Feuchtezuschlags über 8 % erscheint zukünftig ebenso möglich und für die Anwendung in der Konservierungstechnik auch sinnvoll. Die dafür notwendigen Referenzwerte sollten in Zukunft nach dem beschriebenen Prinzip erfasst werden.

6.4 Analyse der Ergebnisse

Die durchgeführten Experimente sollten zum einen die verwendeten Probengewebe hinsichtlich ihrer Degradation charakterisieren, zum anderen das hygrische Verhalten erfassen. Diese beiden Aspekte werden im Folgenden Abschnitt zusammengefasst und analysiert.

6.4.1 Bewertung der Degradation der verwendeten Gewebe

Künstlich gealterte Gewebe

An den künstlich gealterten Geweben, sowie dem dazugehörigen neuen Gewebe N1 wurden folgende Merkmale erfasst: Analyse der Gewebestruktur, Oberflächen pH-Wert, Kettenlänge der Cellulose, Kristallinitätsindex, Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung des Gewebes und an drei ausgewählten Garnen Nullzugfestigkeit.

An den ausschließlich belichteten Geweben[777] konnte durch die Absenkung des pH-Wertes eine vermehrte Oxidation der Cellulose nachgewiesen werden. Vergleichbar waren die Auswirkungen bei Tageslichteinstrahlung und 84 h Xenonbogenlampe. Die Verdopplung der Ein-

777 N1-A-TL, N1-A-X84, N1-A-X168.

strahlung durch die Xenonbogenlampe auf 168h machte sich durch das Absenken um ½ pH-Wert bemerkbar. Die Belichtung mit der Xenonbogenlampe erzeugte neben der Oxidation, eine Verkürzung der Celluloseketten, was durch die Einstrahlung von Tageslicht hinter Fensterglas nicht erreicht wurde. Die Grenzviskositätszahl nahm um 26 (84 h) bzw. 34 % (168 h) ab. Diese Verkürzung der Kettenlänge korreliert jedoch nicht mit der Festigkeit der Gewebe, auch nicht mit der Nullzugfestigkeit des Garns. Es wird davon ausgegangen, wie auch im folgenden noch klarer wird, dass die Verkürzung der Celluloseketten zwar signifikant messbar waren, jedoch noch nicht ausreichte, die Festigkeit von Garn bzw. Gewebe merklich zu schwächen.

Die ausschließlich klimatisch gealterten Gewebe[778], durch erhöhte Temperatur und zyklisch schwankender Umgebungsfeuchte, zeigten keine signifikanten Veränderungen in ihrem Oberflächen pH-Wert. Anhand der GVZ konnte man hingegen Unterschiede feststellen. Die Verkürzung der Celluloseketten nahm mit Dauer der klimatischen Alterung zu, was sich in dieser Deutlichkeit nicht in der Gewebefestigkeit bemerkbar machte. Die Abnahme der Gewebefestigkeit lag lediglich bei 5 % (10 Wochen Alterung) und 7 % (4 Wochen Alterung), während die GVZ nach der 10wöchigen Alterung um 23 % abgenommen hatte.
Die Aufspannung während dem zyklischen Quellen und Schwinden hatte nachweisbare Auswirkungen auf die Degradation der Gewebe. Es konnte eine geringfügig vermehrte Verkürzung der Celluloseketten nachgewiesen werden, wie es die Theorie von Leene et al. beschrieb.[779] Die GVZ des aufgespannten, für 10 Wochen klimatisch gealterten Gewebes, lag um 3 % unter dem nicht aufgespannten Gewebe. Damit zeigte es eine vergleichbare Schädigung wie das für 84h mit der Xenonbogenlampe belichtete Gewebe. Die Aufspannung der Gewebe spiegelte sich auch in einer leichten Erhöhung des Kristallinitätsindexes von 0,78 auf 0,82 wider. Eine signifikante Auswirkung hatte die Aufspannung auf die Ergebnisse der Höchstzugkraft (Abnahme von 10 % nach 10 Wochen) und der Höchstzugkraftdehnung. Die Höchstzugkraftdehnung verringerte sich durch die Aufspannung nach 10 Wochen um 61 %. Das bestätigt Untersuchungen an der HfBK Dresden, die ebenfalls die Reduktion der Dehnbarkeit nach einer klimatischen Alterung auf die Aufspannung zurückführt.[780] Die aufgespannten Geweben waren die einzigen Proben, bei denen die künstliche Alterung eine die signifikante Veränderungen in der Gewebestruktur erkennen liessen. Sie hatten eine geringere Gewebefüllung als die nicht gespannten Gewebe, bei gleichzeitiger Abnahme der Fadendichte.

Durch die Kombination von Belichtung mit der Xenonbogenlampe und anschließender klimatischer Alterung gelang es insgesamt betrachtet, die stärkste Degradation an den Geweben zu erzeugen. Dies spiegelte sich im niedrigsten pH-Wert, der niedrigsten GVZ und der geringsten Gewebefestigkeit wider. Es war erkennbar, dass die Lichteinstrahlung zwar eine signifikante Vorschädigung in den Geweben erzeugte, jedoch die anschließende klimatische Alterung nicht

778 N1-A-K4-u, N1-A-K4-g, N1-A-K10-u, N1-A-K10-g.
779 Siehe Kapitel 3.7.2 „Physikalische/Mechanische Einflüsse“ S. 134.
780 Siehe Kapitel 3.7.3 „Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften“ S. 138f.

in ihrer Abbaurate beschleunigte, wie es durch Lee et al. für Papier und durch Hackney/Hedley für Gewebe nachgewiesen wurde.[781] Für das Gewebe N1-A-X168-K4-u wurde gegenüber dem neuen Gewebe eine Verringerung der Kristallinität festgestellt. Anhand dieses einen Ergebnisses bezüglich der Kristallinität können an dieser Stelle keine Deutungen vorgenommen werden, es müssten hierfür mehr Messergebnisse vorliegen.

Für das bei 105 °C getrocknete Gewebe (N1-A-K105-u) wurden zur Charakterisierung der Degradation der pH-Wert und die Kristallinität bestimmt. Die anderen Merkmale konnten aus organisatorischen Gründen nicht bestimmt werden, da dieses getrocknete Gewebe als zufälliges Nebenprodukt während der Experimente anfiel. Die Trocknung des Gewebes hat keine signifikanten Veränderungen beim pH-Wert verursacht, jedoch die Kristallinität geringfügig ansteigen lassen.

Insgesamt wurde mit der künstlichen Alterung eine messbare Degradation an Gewebe N1 hervorgerufen. Um jedoch die einzelnen Auswirkungen der Alterung signifikanter nachzuweisen, hätte die Alterung intensiver sein können. Anhand der GVZ bewertet, haben sie nicht den Degradationsgrad der historischen Bildträger erreicht.
Der Zustand der Gewebe liess sich durch die Ergebnisse der GVZ am deutlichsten voneinander differenzieren. Die Bestimmung der GVZ stellt eine sehr sensible Methode dar, schon geringe Schädigungen im Gewebe nachzuweisen. Dass sich diese Veränderungen in der Kettenlänge der Cellulose für einen Großteil der hier künstlich gealterten Gewebe nicht in ihrer Festigkeit widerspiegeln, kann zwei Gründe haben. Die GVZ gibt einen Durchschnittswert der Kettenlängen der Cellulosemoleküle wieder. Sinkt dieser Wert, kann zunächst keine Aussage darüber getroffen werden, ob eher die kurzkettigen oder die langkettigen Moleküle gespalten wurden. Möglich ist z. B. dass in der Mehrzahl die kurzkettigen Moleküle gespalten wurden, der Durchschnittswert dadurch sinkt, aber die Höchstzugkraft nicht abnimmt, weil noch ausreichend langkettige Moleküle für die Festigkeit vorhanden sind.
Eine zweite Erklärung ist, dass die Verkürzung der Celluloseketten keinen messbaren Einfluss auf die Festigkeit des gesamten Gewebes nimmt, weil andere Faktoren diese überlagern. Einfluss auf die Festigkeit des Gewebes können die Begleitsubstanzen der Cellulose in der Flachsfaser nehmen, sowie die Garn- und Gewebegeometrie.

Gebleichte Gewebe

An den gebleichten und den dazugehörigen nicht gebleichten Geweben wurden folgende Merkmale erfasst: Analyse der Gewebestruktur, pH-Wert, Kettenlänge der Cellulose, teilweise der Kristallinitätsindex.

781 Lee et al. 1989, Hackney/Hedley 1984. Vrgl. auch Kapitel 3.7.2 „Licht“ S. 161.

Die Gewebestruktur hat sich bei den Geweben N2, N3, N4 und N5 durch das Bleichen verändert. So nahm bei allen Geweben durch das Bleichen eindeutig der Fasersteigungswinkel ab. Bei allen außer Gewebe N2 hat sich darüber hinaus die Gewebefüllung reduziert. Im Gegensatz dazu beobachtete Heydenreich an seinen rasengebleichten Geweben eine leichte Erhöhung der Fadendichte durch das Bleichen. Die Gewebefüllung wurde nicht erfasst.[782]
Während die neuen und ungebleichten Gewebe mit dem Oberflächen pH-Wert im neutralen bzw. leicht sauren Bereich lagen, zeigten alle gebleichten Gewebe pH-Werte im basischen Bereich. Obwohl die Gewebe nach dem Bleichvorgang ausgewaschen wurden, muss davon ausgegangen werden, dass sich in den Geweben Reste der während des Bleichens verwendeten Laugen befanden, die für dieses Ergebnis verantwortlich sind. Dass es durch das Bleichen zu einer erheblichen Schädigung der Cellulose gekommen ist, ist anhand der GVZ nachvollziehbar. Sie lag bei den gebleichten Geweben der 1. Bleichmethode um rund 50—55 % niedriger. Die Bleichmethode 2 verursachte eine noch höhere Schädigung mit einer Abnahme der GVZ von 63 %. Vergleichbare Schädigungen an Flachs wurden von Stoll gemessen, dort nahm die GVZ um 52 bzw. 57 % ab.[783] Für die Kristallinität war keine einheitliche Tendenz ablesbar. Für Gewebe N2 verringerte sie sich nach der Bleiche während sie bei Gewebe N5 unverändert blieb (beides Bleichmethode 1). Die an Gewebe N3 durchgeführte Bleichmethode 2 verursachte eine Erhöhung der Kristallinität. Da die alkalische Vorbehandlung und das Bleichen selbst gegenteilige Effekte auf die Kristallinität haben[784], kann darin die Ursache für die gemessenen Unterschiede liegen. Weitere systematische Untersuchungen wären für eine zweifelsfreie Interpretation nötig, weil auch keine Vergleichsdaten zur Verfügung stehen.

Proben historischer Bildträger

An den historischen Proben wurden folgende Merkmale erfasst: Analyse der Gewebestruktur, Kettenlänge der Cellulose, teilweise der Kristallinitätsindex, teilweise die Nullzugfestigkeit.

Die Werte der GVZ schließen an den unteren Bereich der künstlich gealterten Gewebe an und zeigen damit insgesamt kürzere Celluloseketten als es durch die künstliche Alterung hervorgerufen wurde. Das Alter der Bildträger spiegelte sich nicht im Detail in der GVZ wider, jedoch lagen die Bildträger des 20. Jhs. im oberen Bereich, die Bildträger des 19. Jhs. im mittleren Bereich und die Bildträger des 16.—18. Jhs. im unteren Bereich. Für die niedrigsten Werte der GVZ lies sich ein Zusammenhang zum empirischen Eindruck des Zustandes der Bildträger herstellen. Die Wandbespannung Ermlitz (H-18-E1 und -E2) zeichnete sich durch hohe Fragilität und einen brüchigen Bildträger aus. Der Bildträger, der ohnehin nur geringen mechanischen Belastungen stand hält, zeigte sich noch brüchiger in den braun gefärbten Bereichen, in denen das Vorhandensein von Kupfer in der Malschicht nachgewiesen wurde. Die höhere

782 Heydenreich et al. 2008, S. 612 und 617—618.
783 Siehe Tabelle 3.1, S. 44.
784 Siehe Kapitel 3.5.2 „Bleichen“ S. 82.

Abbaurate zeigte sich durch den niedrigsten Wert der GVZ. Auch das Deutschordengemälde (H-17/18-D) zeichnete sich durch einen fragilen und brüchigen Bildträger aus. Das Melanchthon-Porträt (H-16/17-M) lag sehr dicht an diesen Ergebnissen, hatte jedoch, dem empirischen Eindruck nach, einen wesentlich stabileren Bildträger. Es liegt nahe, dass nicht allein die kurzen Celluloseketten für die Fragilität der Bildträger verantwortlich sein können.
Betrachtet man die Ergebnisse der Kristallinität, fällt auf, dass die genannten fragilen Bildträger niedrige Werte aufzeigten, die stabileren Bildträger hingegen höhere Werte für die Kristallinität. Um diesen Zusammenhang eindeutig nachzuweisen sind jedoch weitere Untersuchungen nötig.

Die historischen Proben decken ein breites Spektrum an Degradationszuständen ab.

6.4.2 Korrelation der gemessenen Parameter der Degradation

Im Zuge der Bewertung des Degradationszustandes der hier verwendeten Gewebe, wurden die gemessenen Parameter teilweise aufeinander bezogen, um die Degradation anhand mehrerer Merkmale charakterisieren zu können. Die dabei gewonnenen Erkenntnisse sollen im Folgenden zusammengefasst werden.
Die Verkürzung der Molekülketten ist eine Folge der Degradation von Cellulose und es entspricht dem aktuellen Forschungsstand, dass dies mit einer Reduzierung der Festigkeit einhergeht.[785] Im Gegensatz zu Papier, wo dieser Zusammenhang nachgewiesen wurde[786], ist er in der Konservierungswissenschaft nicht für Flachsgewebe etabliert.[787] Es lag daher nahe, die Werte der GVZ auf die Werte der Höchstzugkraft des Gewebes zu beziehen. Eine Korrelation wurde anhand der künstlich gealterten Gewebe vorgenommen (Abb. 6.40). Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,56 ist kein linearer Zusammenhang zu erkennen.

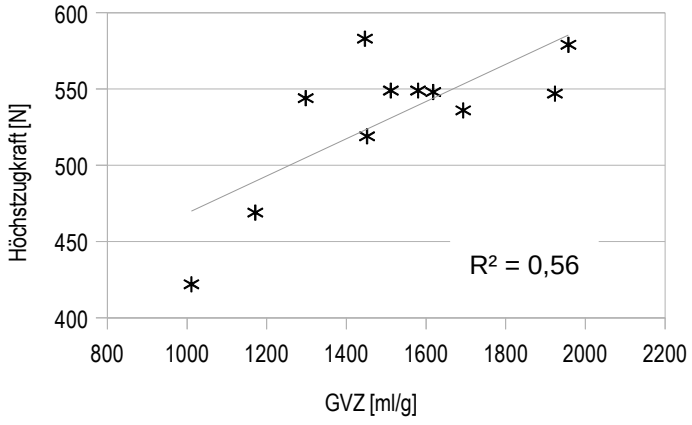


Abbildung 6.40: Korrelation zwischen Höchstzugkraft der Gewebe und Grenzviskositätszahl (GVZ).

785 Tímár-Balázsy/Eastop 1998, S. 11.
786 Zou et al. 1994.
787 Siehe auch Kapitel 4.3, S. 156.

Die Korrelation der GVZ mit den gemessenen Werte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft am Garn (Nullzugfestigkeit) ergab, dass ein nahezu linearer Zusammenhang zwischen den beiden Größen besteht (Abb. 6.41).[788] Dadurch wurde nachgewiesen, dass durch die Bestimmung der Nullzugfestigkeit der Zustand der Cellulose abgebildet werden kann. Dies gelang durch den Ausschluss des Einflusses der Gewebe- und Garngeometrie. Nicht abgebildet wird jedoch die Festigkeit des aus diesem Garn aufgebauten Gewebes.
Alle anderen Merkmale, die in Bezug auf die Degradation der Proben gemessen wurden, konnten nicht miteinander in Zusammenhang gebracht werden.

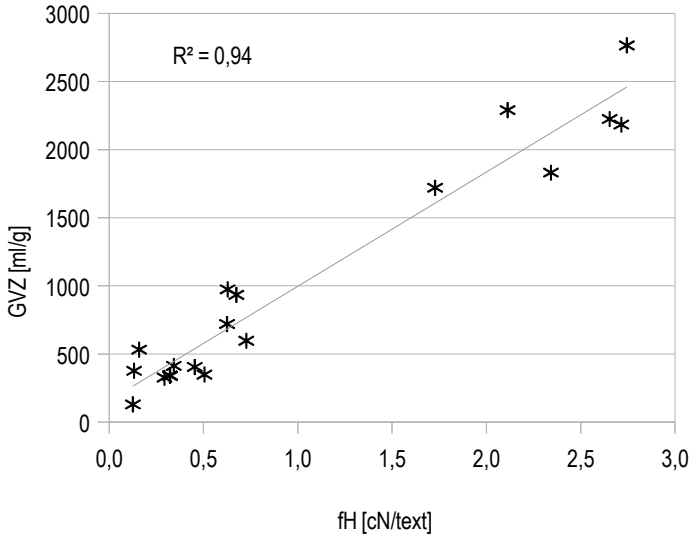


Abbildung 6.41: Korrelation zwischen feinheitsbezogener Höchstzugkraft des Garns (Nullzugfestigkeit) und Grenzviskositätszahl (GVZ).

6.4.3 Zusammenhang zwischen Degradation und hygrischem Verhalten

Die künstliche Alterung der Leinwände hat zur Abnahme ihrer Sorption geführt. Während die Belichtung wenig Auswirkung hatte, verursachte vor allem die klimatische Alterung durch erhöhte Temperatur und schwankende Umgebungsfeuchten die reduzierte Gleichgewichtsfeuchte. Die historischen Proben nahmen nicht grundsätzlich weniger Feuchte auf, als die neue Leinwand. Obwohl der Großteil der historischen Proben mit der Gleichgewichtsfeuchte unter der neuen Leinwand lag, gab es Proben, wie die der Adolf Thomas Gemälde, die mehr Feuchte aufnahmen, als die neue Leinwand. Diese Gemälde zeigten sich besonders sensibel hinsichtlich dem Einwirken von Feuchte. So konnte an ihnen in der Vergangenheit ein Wasserschaden an der Leinwand rekonstruiert werden.

788 Siehe auch Bräunig et al. 2016.

Um den Zusammenhang zwischen Degradation der Proben und deren Feuchteaufnahme systematisch zu untersuchen, wurden die einzelnen Merkmale, die zur Beschreibung der Degradation der Proben gemessen wurden mit dem Feuchtezuschlag verglichen. Die Vergleiche wurden jeweils mit den Ergebnissen des Feuchtezuschlags bei 40, 60 und 95 %rF vorgenommen.
Dabei konnten keine Zusammenhänge zwischen dem Feuchtezuschlag und Merkmalen der Gewebegeometrie festgestellt werden. Abhängigkeiten wie sie DICK für die Gewebefüllung und den Feuchtezuschlag feststellte[789], konnten anhand der hier vorliegenden Ergebnisse nicht fest gestellt werden. Die Gewebefüllungen, die in diesen Vergleich eingingen, lagen insgesamt zwischen 68,4 und 98,6 %. Keinen Zusammenhang mit dem Feuchtezuschlag zeigten ebenso die Ergebnisse des pH-Wertes.
Es sollte untersucht werden, ob es während der Alterung zu einer Erhöhung der Kristallinität kommt und ob diese mit einer reduzierten Feuchteaufnahme einhergeht. Ein grundsätzlicher Zusammenhang zwischen C. I. und Feuchteaufnahme bestand nicht. So blieb beispielsweise der C. I. durch die 10wöchige klimatischen Alterung nahezu unverändert, während die Sorption des Gewebes abnahm. Die im Vergleich dazu aufgespannten Gewebe zeigten einen erhöhten C. I., während ihre Gleichgewichtsfeuchte ebenfalls höher war als die der nicht gespannten Gewebe. Für die Aufnahme von Wassermolekülen spielt nicht nur die relative Menge der kristallinen Bereiche eine Rolle, die durch den C. I. ausgedrückt wird, sondern auch die Variation der Größe der Kristallite und deren Verteilung. Die Wassermoleküle lagern sich nicht nur in den amorphen Bereichen an, sondern auch an der Oberfläche der Micellen, weshalb die genannten Merkmale ebenso einflussgebend sind. Daher können Materialien des gleichen C. I. durchaus unterschiedliche Gleichgewichtsfeuchten zeigen, wenn sie in den genannten Punkten voneinander abweichen.[790]

Die Aufspannung während zyklischem Quellen und Schwinden lies die Leinwände, gemessen an der Kettenlänge der Cellulose, der Festigkeit und Dehnbarkeit der Gewebe, stärker altern als es bei ungespannten Leinwänden der Fall war. Gleichzeitig nahm die Gewebefüllung ab. Es wurde festgestellt, dass die aufgespannten Gewebe eine Erhöhung der Kristallinität zeigten. Im Vergleich zum neuen Gewebe N1 nahmen sie weniger Feuchte auf, jedoch wiesen sie einen höheren Feuchtezuschlag auf gegenüber den ungespannten Geweben.
Ursächlich für die Erhöhung der Feuchteaufnahme könnten Veränderungen in den Zwischen- und Hohlräumen sein, die jedoch anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht beurteilt werden können. Die Auswertung der GAB-Parameter zeigte diesbezüglich durch die Abnahme von *K* bei den aufgespannten Geweben, dass die Menge des freien Wassers gegenüber den im Multilayer gebundenen Wassermolekülen abnimmt. Aus dieser Perspektive wäre das freie Wasser nicht für den höheren Feuchtezuschlag verantwortlich.

789 Siehe Kapitel 3.5.3, S. 85.
790 KRÄSSIG 1993, S. 168 und S. 171.

Die Alterung der Leinwand und ihre Gleichgewichtsfeuchte wird den Ergebnissen zu Folge maßgeblich durch die Aufspannung beeinflusst. Die Beurteilung der Eigenschaften des Bildträgers am Spannrand wird demzufolge nicht den Gegebenheiten des Bildträgers in der Bildmitte entsprechen.
Die Kettenlänge der Cellulose, ausgedrückt durch die GVZ, war der einzige Parameter, der annähernd einen linearen Zusammenhang zur Gleichgewichtsfeuchte erkennen lies. Höhere Werte der GVZ korrelierten mit höheren Werten für den Feuchtezuschlag. Die Korrelation der GVZ mit Werten des Feuchtezuschlags für 40 bzw. 60 %rF erbrachte ein Bestimmtheitsmaß (R^2) von 0,8 bzw. 0,82. Die Korrelation mit Werten von 95 %rF erbrachte jedoch kaum Zusammenhang. Dies lässt sich damit erklären, dass der molekulare Zustand der Cellulose, der durch die GVZ beschrieben wird, nicht maßgeblich Einfluss nimmt auf die Feuchteaunahme in hohen Bereichen der rF. Dort ist das freie Wasser bestimmend.[791] Dieses Ergebnis entspricht nicht der im theoretischen Teil formulierten Theorie, dass mit abnehmender Kettenlänge die Sorptionsfähigkeit zunimmt.[792]
Für die Überprüfung der Zusammenhänge der Alterung und der Feuchteaufnahme wurden auch die einzelnen GAB-Parameter, die durch die mathematische Modellierung bestimmt wurden, mit den Werten des pH-Wertes, der GVZ und des C. I. korreliert. Es konnten keine linearen Abhängigkeiten fest gestellt werden.

Erstmals wurden im Rahmen dieser Arbeit die Auswirkungen der historischen Rasenbleiche auf Leinwände, hinsichtlich der dadurch verursachten Degradation sowie der Aufnahme von Feuchte untersucht. Es konnte nachgewiesen werden, dass die Rasenbleiche das Gewebe deutlich altert. Dies war durch die signifikante Abnahme der GVZ messbar. Alle gebleichten Leinwände nahmen weniger Feuchte auf als die ungebleichten Leinwände. Die Befeuchtung der Leinwände mit Lauge während der Rasenbleiche, im Vergleich zum Befeuchten mit Wasser, hatte in Bezug auf die Kristallinität und das Sorptionsverhalten entgegengesetzte Auswirkungen: sowohl die Kristallinität als auch die Sorption lagen höher als durch die Behandlung mit Wasser. Dort blieb die Kristallinität unverändert, bzw. leicht verringert, während die Sorption abnahm. Der in Kapitel 3.2.1 (S. 48) dargestellte Bezug zwischen der Sorptionsfähigkeit und Kristallinität der Cellulose würde erwarten lassen, dass sich das Material anders verhält. Bei steigender Kristallinität wäre eine reduzierte Feuchteaufnahme zu erwarten.
Weil bisher keine Ergebnisse publiziert wurden, die sich mit der Sorptionsfähigkeit von Rasengebleichten Flachsgeweben beschäftigten, können keine Vergleichswerte herangezogen werden.

Die gemessenen Merkmale der Degradation beschreiben den molekularen und supramolekularen Zustand der Cellulose in den Leinwänden. Dieser konnte nicht grundsätzlich für alle Proben mit der gemessenen Gleichgewichtsfeuchte in Zusammenhang gebracht werden. Es be-

791 Siehe Abbildung 3.2, S. 39.
792 Siehe Kapitel 3.7.1 „Hygrisches Verhalten degradierter Cellulose“ S. 129.

stand jedoch ein gewisser Zusammenhang zwischen der Kettenlänge der Cellulose, ausgedrückt durch die GVZ, und der Höhe des Feuchtezuschlags bei 40 und 60 %rF.

Der Zusammenhang zwischen zunehmender Kristallinität während der Alterung und dadurch verursachte Abnahme der Feuchteaufnahmefähigkeit konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht nachgewiesen werden. Dadurch eröffnet sich ein lohnendes Forschungsgebiet, vor allem sollte die Messmethode mit der IR-Spektroskopie verifiziert werden. Erst dann können belastbare Ergebnisse erwartet werden. Sollte es sich bestätigen, dass zwischen der Gleichgewichtsfeuchte und der Kristallinität kein Zusammenhang besteht, wäre zu prüfen, ob es die im Gewebe auf allen strukturellen Ebenen vorkommenden Zwischen- und Hohlräume sind, die für die Menge der aufgenommenen Feuchte verantwortlich sind. Es kann mit den vorliegenden Ergebnissen nicht bewertet werden, ob die bestehenden Theorien, über die Veränderung des molekularen und supramolekularen Zustands der Cellulose in Verbindung mit der Aufnahme von Feuchte Gültigkeit für Leinwände besitzen, oder ob sie hinter anderen Einflüssen zurück bleiben.

Die Untersuchung der unterschiedlichen Leinwände hat gezeigt, dass es möglich ist, bei bekannter Alterung Rückschlüsse zum hygrischen Verhalten zu ziehen. Aber umgekehrt ist es nur sehr eingeschränkt möglich, bei unbekannter Alterung die Unterschiede im Feuchtezuschlag zu deuten.

7 Zusammenfassung

7.1 Erkenntnisse aus dem theoretischen Teil der Arbeit

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde erstmalig das vorhandene Wissen zum hygrischen Verhalten der Leinwand, also dem Flachsgewebe, welches als Bildträger eines Gemäldes dient, aus unterschiedlichen Disziplinen umfassend zusammengetragen.[793] Die Erkenntnisse wurden in Bezug zueinander gesetzt und auf ihre Übertragbarkeit auf die Leinwand hin bewertet. Zusammen mit der Analyse des Forschungsstandes[794] ergibt sich ein für die Konservierungswissenschaft nötiges Bild, welches das Wissen und die entsprechende Lücken in diesem Wissen darstellt.
Es wurde deutlich, dass für das hygrische Verhalten einer Leinwand maßgeblich ihr Aufbau einflussgebend ist. Die kleinste Einheit dieses Aufbaus der Leinwand ist die Flachsfaser. Deren Grundelement ist die aus langen Polymerketten bestehende Cellulose. Zusammen mit Hemicellulosen, Pektinen und Lignin bildet sie die Elementarfasern, die gebündelt im Stängel der Flachspflanze liegen. Gebündelte Elementarfasern (technische Faser) werden zum Garn versponnen und zum Gewebe verwebt und zum Bildträger eines Gemäldes weiter verarbeitet. Im Zuge der Alterung können sich die einzelnen Strukturen verändern.
Durch diesen vielschichtigen Aufbau fließen für die Erklärung des Verhaltens einer Leinwand Ergebnisse aus unterschiedlichen Disziplinen ein. Im Wesentlichen sind es Erkenntnisse aus der Cellulosechemie, der Textiltechnik und der Konservierungswissenschaft.

Im Folgenden werden die wichtigsten Erkenntnisse zum hygrischen Verhalten, anhand des strukturellen Aufbaus der Leinwand dargestellt, die sich aus der umfassenden Darstellung aus Kapitel 2 und 3 ableiten lassen.

Elementarfaser

Es hat sich aus der Beleuchtung des Forschungsstandes gezeigt, dass die Cellulosechemie eine wichtige Grundlage für das Verständnis des Verhaltens einer Leinwand darstellt. Es liegen zahlreiche Forschungsergebnisse zum Aufbau, Reaktionsverhalten und Alterung der Cellulose vor, dennoch ist ihre übermolekulare Struktur auch heute noch Gegenstand der Forschung und

793 Siehe Kapitel 3 „Von der Cellulose zum Leinwandgemälde: Einflussfaktoren auf das hygrische Verhalten der Leinwand“.
794 Kapitel 2 „Forschungsstand“.

nicht restlos erklärt. Die Cellulosechemie kann Phänomene der Leinwand auf der Ebene der Mikro- und Makrofibrillen einer Elementarfaser erklären.

In der Elementarfaser von Flachs liegen die Celluloseketten in unterschiedlichen Längen vor, was durch den durchschnittlichen Polymerisationsgrad (DP) ausgedrückt wird. In Bezug auf andere Faserstoffe ist der Zusammenhang belegt, dass kurzkettige Polymere mehr Feuchte binden können als langkettige. Ob dieser Effekt auch für die Cellulose in Flachsfasern gilt, deren Kettenlänge im Zuge der Alterung abnimmt, wurde bisher nicht thematisiert.
Celluloseketten ordnen sich in der Elementarfaser im Wechsel zwischen kristallinen und amorphen Bereichen an. Diese supramolekulare Struktur wird durch Wasserstoffbrückenbindungen zwischen den einzelnen Celluloseketten ermöglicht. Tritt die Leinwand in Wechselwirkung mit Feuchte, werden Wassermoleküle an die funktionellen Gruppen der Celluloseketten gebunden und verändern die dort schon bestehenden Wasserstoffbrückenbindungen, die für die supramolekulare Struktur verantwortlich sind. Auf diese Weise kommt es durch Sorption und Desorption zu Veränderungen in der supramolekularen Struktur von Cellulose. Die Veränderungen sind nicht immer reversibel. Das trifft insbesondere auch auf starke Trocknungen zu. So führt eine Erhitzung unter Abwesenheit von Feuchte zu einem reduzierten Feuchteaufnahmevermögen, eine Erhitzung bei Anwesenheit von Feuchte jedoch zu einer vermehrten Bindungsmöglichkeit von Feuchte.
Wassermoleküle werden hauptsächlich in der Sekundärwand der Elementarfaser aufgenommen. Dort liegt ein hoher Anteil an Cellulose vor. Die Celluloseketten liegen im Wechsel zwischen amorphen und hoch geordneten, kristallinen Bereichen in fibrillären Strukutren vor. Nur die amorphen Bereiche sind flexibel genug, um Wassermoleküle eindringen zu lassen. Daher wird das Verhältnis zwischen amorphen und kristallinen Bereichen, ausgedrückt als Kristallinitätsindex, als einflussgebend auf die Aufnahme von Wassermolekülen gewertet. Man geht davon aus, dass sich die Kristallinität im Zuge der Alterung von Cellulose erhöht, wodurch sich die Feuchteaufnahme reduziert. Die Bestimmung des Kristallinitätsindexes an Textilfasern hat sich in der Konservierungswissenschaft bisher nicht etabliert. Der Zusammenhang zu Sorptionseigenschaften wurde an der Leinwand bisher nicht nachgewiesen.
Zwischen den Celluloseketten können Wassermoleküle in unterschiedlichen Schichten gebunden werden: im direkt an den Celluloseketten gebundenen einschichtigen Monolayer, im darauf liegenden Multilayer und als wenig fest gebundenes freies Wasser, welches in Clustern eine gewisse Beweglichkeit aufweist. In welchen Mengen die unterschiedlichen Formen der Bindung auftreten, hängt von der Umgebungsfeuchte und dem molekularen, supramolekularen und morphologischen Aufbau der Fasern ab. Der morphologische Charakter, also die Zwischen- und Hohlräume innerhalb der Elementarfaser wurden in der Konservierungswissenschaft bisher nicht für Textilfasern definiert. Ihr Einfluss auf hygrische Eigenschaften ist bisher unklar.

Zur Rolle der neben Cellulose vorkommenden Begleitsubstanzen in der Elementarfaser in Bezug auf das hygrische Verhalten ist wenig bekannt, ebenso wie sich diese im Zuge der Alterung verändern. Einige Autoren sprechen ihnen jedoch eine gewisse Einflussnahme auf die Feuchteaufnahmefähigkeit zu.

In Bezug auf gealterte Leinwände, geht man davon aus, dass sich die Aufnahme von Feuchte reduziert. In der Regel wird dies mit dem Zustand der Cellulose erklärt, vor allem mit der Zunahme der Kristallinität. Belegt wurde dieser Zusammenhang bisher nicht an textilen Bildträgern. Gänzlich unberücksichtigt blieben in diesem Zusammenhang Veränderungen in der Struktur des Fasermaterials in Bezug auf Hohlräume und Poren.

Technische Faser, Garn und Gewebe

Die der Elementarfaser übergeordneten Strukturen, die technischen Fasern, Garne und Gewebe werden insbesondere in der Textiltechnik behandelt. Für Flachs, welches in der vorliegenden Arbeit betrachtet wurde, liegt der Großteil der Forschungserkenntnisse zeitlich weit zurück, da der Flachsanbau und die Flachsverarbeitung in Europa nach dem 2. Weltkrieg keine wesentliche Rolle mehr spielte und damit auch keine nennenswerte Grundlagenforschung betrieben wurde. Da sich die experimentellen Möglichkeiten im Laufe der Zeit weiter entwickelt haben, ist es lohnenswert zu hinterfragen, welche Ergebnisse mit modernen Messmethoden präzisiert werden können.
Zum relativ aufwendigen Prozess der Gewinnung der Fasern aus der Pflanze und ihre Aufbereitung für das Verspinnen zu Garnen liegt keine Übersicht über die historische Entwicklung vor. Dadurch ist unbekannt, ob und wie sich mögliche Veränderungen in der Verarbeitung auf die Materialeigenschaften auswirken. Die Verarbeitung von Garn und Gewebe sind in ihrer historischen Entwicklung hingegen relativ gut belegt. Ihr Einfluss auf das hygrische Verhalten bleibt ein Desiderat.

Anbau und Ernte der Flachspflanze nehmen Einfluss auf die Qualität des Fasermaterials, was sich in der Länge und Feinheit der technischen Fasern widerspiegelt. Der vielstufige Verarbeitungsprozess von der geernteten Flachspflanze zur verspinnbaren technischen Faser beeinflusst die Zusammensetzung (Begleitsubstanzen der Cellulose) und die Qualität der technischen Fasern. Vor allem nimmt hierauf die Dauer und Art der Röste Einfluss. Die weiteren Verarbeitungsschritte bestimmen über die Anteile von Schäben, Werg und Langfasern im daraus entstehenden Garn. Durch die unterschiedliche Sorptionsfähigkeit dieser Bestandteile beeinflussen ihre Anteile im Garn die Menge der aufgenommenen Feuchte. Über die jeweilige Zusammensetzung der Garne sowohl in Bezug auf die Begleitsubstanzen neben der Cellulose als auch hinsichtlich der Anteile von Schäben, Werg und Langfasern in Leinwänden wurden bisher keine Informationen publiziert.

Inwiefern die unterschiedlichen Spinnmethoden Einfluss auf die Garngeometrie nehmen, ist bisher nicht untersucht worden, vor allem hinsichtlich der Unterschiede zwischen manuell und maschinell gesponnenen Garnen. Eine eindeutige Zuordnung von manuell und maschinell gesponnenen Garnen ist bisher an Leinwänden nicht vorgenommen worden. Gleiches gilt für manuelles und maschinelles Weben.
Nachgewiesen wurde hingegen, dass die unterschiedlichen maschinellen Spinnverfahren nass, halbnass und trocken, darauf Einfluss nehmen, wie viel Feuchte die daraus entstehenden Garne aufnehmen.
Art und Menge von Schlichten im Garn nehmen Einfluss sowohl auf die Menge der gebundenen Feuchte als auch auf die Dimensionsänderungen. Das Vorhandensein von Schlichten in Leinwänden wurde bisher nicht untersucht oder belegt.

Für Flachsgarne wurden Werte zwischen 9 und 12 % für den Feuchtezuschlag publiziert (20 °C/65 %rF). Die vereinzelten Versuche, zu differenzieren, welche Einflussfaktoren für die Unterschiede verantwortlich sind, reichen derzeit nicht aus, ein klares Bild zu zeichnen. Die aus Sorption und Desorption resultierenden Dimensionsänderungen in Form von Breiten- und Längsquellung können anhand der Datenlage nicht quantifiziert werden. Ergebnisse von Elementarfasern oder technischen Fasern können nicht auf das Garn übertragen werden, weil die Garngeometrie dann unberücksichtigt bleibt.

Wie viel Feuchte ein Flachsgewebe aufnimmt, kann aus der Datenlage nicht abgeleitet werden, weil kaum Ergebnisse hierzu vorliegen. Folglich kann auch nicht bewertet werden, ob Daten der technischen Fasern oder Garne auf ein Gewebe übertragen werden können. Vergleiche von Sorptionsisothermen wären hier aufschlussreich. Ebensowenig wurden bisher Dimensionsänderungen von Flachsgeweben quantifiziert. Diese Dimensionsänderungen können sich als Expansion, Quellungsschrumpf und Relaxationsschrumpf äußern.
Die Art der Reaktion scheint auch von der Menge der aufgenommenen Feuchte abzuhängen, insbesondere im Übergang zwischen dem Einwirken von Wasserdampf und flüssigem Wasser. Eine Bewertung war jedoch bisher nicht möglich, weil bisherige Reaktionen und Verhaltensweisen von Flachsgeweben auf die Umgebungsfeuchte bezogen wurden und nicht auf die jeweilige Gleichgewichtsfeuchte im Gewebe.
Ob die Geometrie Einfluss auf die Menge der aufgenommenen Feuchte von Garn und Gewebe nimmt, ist nicht erforscht, jedoch nimmt sie Einfluss auf die Art und Ausmaß der Dimensionsänderungen. Konkrete Daten hierzu liegen jedoch kaum vor, sodass eine Einschätzung nicht möglich ist. Die relevanten Parameter sowohl der Garn- als auch der Gewebegeometrie, u. a. die Feinheit und Dichte wurden bisher nicht an der Leinwand bestimmt. Von Interesse wäre es zu untersuchen, ob sich diese Merkmale während der Alterung verändern. Durch wiederholtes Quellen und Schwinden einer Leinwand im aufgespannten Zustand ist es durchaus denkbar, dass sich in Bezug auf Geometrie und Dichte Veränderungen ergeben.

Textiltechnische Veredlungsprozesse sind nicht vollständig in ihrer historischen Entwicklung belegt. Ihre Rolle für Gewebe, die als Bildträger eines Gemäldes zum Einsatz kamen, ist bis heute ungeklärt. Aus diesem Grund können Auswirkungen auf das hygrische Verhalten nur vermutet werden. Sicher kann gesagt werden, dass sich alle wässrige Behandlungen, Trocknungsprozesse und der Einsatz von stark quellenden Lösungsmitteln (Alkalien) auf das hygrische Verhalten auswirken. Gleiches gilt für das Bleichen. Moderne Bleichbehandlungen führen zu einer reduzierten Feuchteaufnahme, ähnliche Auswirkungen werden auch für die historische Rasenbleiche erwartet, belegt wurde dies bisher jedoch nicht.

Leinwand

Aus konservierungswissenschaftlicher Sicht klaffen große Lücken im Wissen um die Herstellung und den Aufbau textiler Bildträger. Dokumentationen von Faserart und geometrischer Merkmale von Garn und Gewebe liegen bis heute nicht von statistisch auswertbarem Umfang vor. Dementsprechend wurden sie in bisherigen Untersuchungen zum hygrischen Verhalten von Leinwänden nur in Einzelfällen betrachtet.

Innerhalb der Konservierungswissenschaft wurde das hygrische Verhalten von Leinwänden und Leinwandgemälden im Wesentlichen anhand ihres mechanisch-physikalischen Verhaltens erforscht. Die Untersuchungen basierten auf dem Vorgehen, Dimensionsänderungen der Gewebe, hervorgerufen durch wechselnde Umgebungsfeuchten, in Form von Spannungen aufzuzeichnen. Daraus wurde klar, dass die Gewebegeometrie und die auf die einzelnen Fäden wirkenden Kräfte entscheidende Faktoren sind, wie sich die Leinwand verhält. Beide Merkmale wurden bisher jedoch entweder nur oberflächlich oder auf unterschiedliche Weise dokumentiert.

In Bezug auf das Verhalten des Leinwandgemäldes mit Vorleimung, Grundierung und Malschicht, wird in der Forschungsmeinung der Vorleimung eine besondere Rolle zugesprochen. So geht man davon aus, dass die Leinwand bei niedrigen und mittleren Umgebungsfeuchten nicht in der Lage ist, die Kräfte des Leinwandgemäldes zu tragen und stabil zu bleiben. Diese Rolle kommt stattdessen der Vorleimung zu. Erst bei relativ hohen Umgebungsfeuchten übernimmt die Leinwand die tragende Funktion des Gemäldes, durch ihre Steifigkeit. Auch in Bezug auf die Art der Dimensionsänderungen wird die Vorleimung als wesentlicher Einflussfaktor gewertet.
Die tatsächlichen Kenntnisse und historische Belege über die Bindemittel und ihre Auftragsmenge und -art für Vorleimungen sind relativ gering. Hinzu kommt, dass nur eine geringe Zahl an konkreten Untersuchungen vorliegt, die diese Theorie unterstützen. Ein Teil davon basiert auf einzelnen Computersimulationen, die an historischen Gemälden des 19. Jhs. verifiziert wurden. Es muss in Frage gestellt werden, ob dieser relativ spezielle Aufbau jener Zeit repräsentativ für eine viel größere Gruppe an Leinwandgemälden gelten kann.

Ein Großteil der Untersuchungen zum hygrischen Verhalten erfolgte an der letzten strukturellen Ebene des Aufbaus des Leinwandgemäldes: der Leinwand als Bildträger mit aufliegenden Schichten. In Bezug auf den Aufbau dieser Leinwandgemälde, vor allem in Hinblick auf den Bildträger, die Leinwand, herrscht in vielen Aspekten völlige Unkenntnis. Es ist festzustellen, dass ein Ungleichgewicht besteht zwischen den relativ umfangreich vorliegenden Erkenntnissen auf der Ebene der Fibrillen durch die Cellulosechemie, und den einzelnen Ergebnissen aus der Textiltechnik zumeist auf der Ebene der technischen Fasern und des Garns, und den Untersuchungen an der Leinwand oder dem Leinwandgemälde. Die bestehenden Wissenslücken in Bezug auf den Aufbau decken sich auch weitestgehend mit den Lücken in dem Wissen um das hygrische Verhalten. Der Kenntnisstand zu Aufbau und Verhalten der Leinwand nimmt mit zunehmender Komplexität ab. Hinzu kommt, dass relative gut erforschte Erkenntnisse bezüglich der Cellulose bisher nicht am Flachsgewebe bzw. der gealterten Leinwand nachgewiesen wurden.

Bisher wurden Veränderungen im Sorptionsverhalten im Zuge der Alterung von Leinwänden auf Veränderungen in der Cellulose zurück geführt. Zum einen ist dies darin begründet, dass wesentliche Sorptionseigenschaften der Leinwand auf das Verhalten der Cellulose zurück gehen, vielleicht liegt es jedoch auch daran, dass diese Ebene im Aufbau der Leinwand am besten erforscht ist und sich konkrete Erklärungsmodelle anbieten. So geht man davon aus, dass sich die Menge der aufgenommenen Feuchte mit der Alterung reduziert, im wesentlichen auf Grund der ansteigenden Kristallinität. Tatsächlich sind experimentelle Daten zur Feuchteaufnahme gealterter Leinwände ein dringendes Desiderat. Auch der Zusammenhang zwischen Veränderungen der Kristallinität und Sorptionseigenschaften wurde an Leinwänden bisher nicht nachgewiesen. In diesem Zusammenhang steht auch die Notwendigkeit, der objektiven Erfassung des Degradationsgrades gealterter Leinwände, was bis heute nicht ohne weiteres möglich ist. In der Regel werden durchschnittlicher Polymerisationsgrad, pH-Wert und Festigkeitseigenschaften empfohlen oder gemessen, für deren Durchführung jedoch kein Konsens hinsichtlich der Messtechnik besteht. Für Flachsgewebe existieren keine Erkenntnisse über die Zusammenhänge dieser Merkmale in Bezug auf die Alterung der Leinwände.
Diese Mängel in der Kenntnis zur Herstellung, Verarbeitung und Alterung der Leinwände lässt folglich keine Rückschlüsse zwischen diesen Merkmalen und deren Auswirkung auf das hygrische Verhalten zu.

Wie in Kapitel 4 erläutert, können zusammenfassend folgende Faktoren als einflussgebend auf das hygrische Verhalten der Leinwand benannt werden: Wechselwirkungen mit Wasserdampf oder flüssigem Wasser, Kontakte mit stark quellenden Chemikalien, die Zusammensetzung der Leinwand, die Garn- und Gewebegeometrie, das Ein- und Aufbringen anderer Materialien, auf die Leinwand wirkende Kräfte und die Degradation.
Es sind all jene Faktoren, die den Aufbau der Leinwand, unabhängig von der strukturellen Ebene, verändern. Es wurde offenbar, dass der Aufbau wesentlich für das Verhalten der Lein-

wand verantwortlich ist, dieser aber in den bisherigen Untersuchungen der Konservierungswissenschaft meist unzureichend Charakterisiert wurde. Dadurch ist es bisher nicht gelungen, einflussgebende Faktoren zu definieren und diese voneinander zu differenzieren. Gleichzeitig wurden Verhaltensweisen bisher in Bezug zur jeweiligen Umgebungsfeuchte gesetzt. Es fehlt der Bezug zur tatsächlichen Materialfeuchte für das jeweilige Material, wofür es an geeigneten Messinstrumenten fehlt. Diese kann abhängig vom Ausgangsmaterial unterschiedlich sein. Bei der Komplexität der Einflussfaktoren, kann man leicht feststellen, dass es nicht möglich ist, das hygrische Verhalten von anderen Faserstoffen abzuleiten, z B. Baumwolle, Hanf oder Jute.

Eine Einschätzung oder Vorhersage des hygrischen Verhaltens eines Leinwandgemäldes ist derzeit nicht möglich. Auch die Höhe der Umgebungsfeuchte für die Befeuchtung von Leinwänden im Zuge von konservatorischen bzw. restauratorischen Maßnahmen erfolgt auf der Basis rein empirischer Erfahrungen. Objektive Entscheidungshilfen stehen dem Restaurator derzeit nicht zur Verfügung.

7.2 Erkenntnisse aus dem experimentellen Teil der Arbeit

Ziel des experimentellen Teils der Arbeit war es, zu untersuchen, ob ein Zusammenhang zwischen dem Zustand der Cellulose auf molekularer und supramolekularer Ebene, und der Gleichgewichtsfeuchte an unterschiedlich degradierten Leinwänden nachgewiesen werden kann. Im Vordergrund stand die Entwicklung eines methodischen Vorgehens und die Auswahl und Überprüfung relevanter Messverfahren.

7.2.1 Bewertung einzelner Messverfahren

pH-Wert Bestimmung

Der pH-Wert von Leinwänden konnte zuverlässig mit der Oberflächenelektrode gemessen werden. Jedoch ist dies aufgrund der dafür notwendigen Durchfeuchtung des Gewebes nicht immer für historische Leinwände möglich. Daher ist es wünschenswert weitere Forschung an geeigneten Messverfahren zu betreiben, wie z. B. der Einsatz chemischer Sensoren.

Kapillarviskosimetrie zur Bestimmung der Kettenlänge der Cellulose

Die Kapillarviskosimetrie stellt eine sehr sensible Methode dar, um Informationen über die Kettenlänge der Cellulose zu erhalten. Die geringe erforderliche Probenmenge kann in der Regel auch von historischen Leinwänden entnommen werden. Auf die bisherige Berechnung des durchschnittlichen Polymerisationsgrades (DP) sollte jedoch zugunsten einer besseren Vergleichbarkeit der Ergebnisse verzichtet werden. Es wird empfohlen, die Grenzviskositätszahl (GVZ) als Bezugsgröße zu verwenden bzw. zusätzlich zum DP anzugeben.

IR-Spektroskopie zur Bestimmung der Kristallinität der Cellulose

Die IR-Spektroskopie wäre für die Anwendung an historischen Leinwänden prinzipiell vorteilhaft. Dafür sprechen die geringe Probenmenge, wenig aufwendige Probenvorbereitung und die gute Verfügbarkeit von IR-Spektrometern im konservierungswissenschaftlichen Umfeld. Die Aussagekraft der Ergebnisse kann anhand der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen jedoch nicht abschließend bewertet werden. Die Auswertung der Spektren (Grundlinienkorrektur und Positionierung der lokalen Hilfslinien) ist auf unterschiedliche Weise möglich und führt zu wesentlichen Unterschieden in den Ergebnissen. Hier wäre es wünschenswert die Ergebnisse mit einer anderen Bestimmungsmethode zu verifizieren und einen Standard zu entwickeln.

Nullzugfestigkeit am Garnabschnitt

Durch die Entwicklung einer Vorgehensweise, die Nullzugfestigkeit am Garnabschnitt zu bestimmen, liegt erstmals eine Bestimmungsmöglichkeit vor, die Festigkeit von Garnen an historischen Leinwänden zu bestimmen. Es wurde gezeigt, dass eine hohe Korrelation zur GVZ vorliegt. Es muss im Einzelfall abgewogen werden, ob die erforderliche Probenmenge von insgesamt 60 mm entnommen werden kann. Die Informationen zur Festigkeit einzelner Garne erlaubt keinen direkten Rückschluss auf die Festigkeit der Leinwand. Diese Zusammenhänge gilt es in zukünftiger Forschung noch näher zu untersuchen. Darüber hinaus darf nicht vergessen werden, dass die Entnahme der Proben in den meisten Fällen am Spannrand des Bildträgers eines Leinwandgemäldes erfolgen wird. Wie die Untersuchungen der vorliegenden Arbeit belegen, verläuft die Alterung eines gespannten Gewebes anders als im ungespannten Zustand, was es bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen gilt.

Erfassung der Gleichgewichtsfeuchte in Form von Sorptionsisothermen

Sowohl die statische als auch die dynamische Methode (DVS) zur Erstellung von Sorptionsisothermen erbrachten belastbare Ergebnisse. Die Durchführung im DVS erfordert weniger Zeit

und ermöglicht die Verwendung sehr geringer Probenmengen, wodurch auch Proben historischer Leinwände erfasst werden können. Die Auswertung der Isothermen durch die mathematische Modellierung mit dem GAB-Modell ist mit hoher Übereinstimmung möglich und stellt eine sinnvolle Interpretationshilfe dar. Die Bedeutung der einzelnen Modellparameter in Bezug auf Flachsgewebe sollte noch weiter vertieft werden.

Erfassung der Gleichgewichtsfeuchte mittels NIR-Spektroskopie

Ein NIR-Spektroskop der Firma Lichtblau konnte im Rahmen der vorliegenden Arbeit soweit kalibriert werden, dass die Erfassung der Gleichgewichtsfeuchte mittels NIR-Spektroskopie zuverlässig möglich ist. Der Konservierungswissenschaft würde damit ein Instrument von unschätzbarem Wert zur Verfügung stehen, um die Gleichgewichtsfeuchte in situ an der Leinwand zu messen. Damit wäre es erstmalig möglich, Beobachtungen zum hygrischen Verhalten nicht nur in Beziehung zur Umgebungsfeuchte zu setzen, sondern zu der jeweiligen Gleichgewichtsfeuchte des Materials. Sowohl für die Durchführung weiterer Grundlagenforschung als auch für die Beobachtung am Bildträger originaler Gemälde ist ein derartiges Messinstrument eine wertvolle Bereicherung. Um über ein einsatzbereites Gerät zu verfügen, sollten weitere Referenzmessungen durchgeführt werden. Vor allem gilt es noch die Übertragbarkeit auf gealterte Leinwände zu verifizieren.

Variable Pressure Rasterelektronenmikroskopie (VP-REM) und Nano-Computertomographie

Aus den Erkenntnissen des theoretischen Teils der vorliegenden Arbeit lies sich ableiten, dass zu Dimensionsänderungen von Leinwänden als Folge von Sorption und Desorption kaum Daten vorliegen. Auch in Bezug auf Garn, technische Faser und Elementarfaser können keine Aussagen getroffen werden, wie groß die Dimensionsänderungen sind. Die Überprüfung der Anwendung des VP-REM und der Nano-Computertomographie hat ergeben, dass sich beide Geräte eignen, diese Wissenslücke zu minimieren, indem bei verschiedenen Umgebungsfeuchten Dimensionsänderungen auf allen strukturellen Ebenen der Leinwand beobachtet werden können. Vor der Anwendung beider Verfahren, sollte ihre Übertragbarkeit der Bedingungen auf reale Verhältnisse überprüft werden.

7.2.2 Erkenntnisse aus den durchgeführten Experimenten

Ziel des experimentellen Teils war die Untersuchung neuer, gebleichter und degradierter Leinwände hinsichtlich ihres Degradationszustandes und der Kapazität Feuchte aufzunehmen. Der

Degradationszustand sollte auf der molekularen und supramolekularen Ebene der Cellulose erfasst werden und mit dem Feuchtezuschlag in Verbindung gebracht werden.
Über diese Fragestellung hinaus wurden wichtige Erkenntnisse zur Methodik und zur Degradation von Leinwänden hervor gebracht.

Erkenntnisse zur künstlichen Alterung

Die Belichtung mit Tageslicht hat keine nennenswerten Degradationsmechanismen im Gewebe bewirkt. Aus organisatorsichen Gründen fand die Belichtung in den Wintermonaten statt. Die Belichtungsintensität könnte durch die Wahl von Sommermonaten intensiviert werden. Weit aus effektiver war die Belichtung im Xenotest®, die jedoch mit einer sehr geringen Probengröße einhergeht. Es wäre wünschenswert größere Gewebestücke mit der Xenonbogenlampe belichten zu können, weil sich dadurch keine Einschränkung aufgrund der Gewebegröße für die folgenden Experimente ergibt.
Die Kombination von Belichtung und klimatischer Alterung hat zu einer messbaren Degradation geführt. Es wird vermutet, dass einzelne Ergebnisse der durchgeführten Experimente bei einer noch intensiveren Alterung signifikanter hervorgetreten wären.
Eine Aufspannung während der klimatischen Alterung, insbesondere durch das zyklische quellen und schwinden) verstärkt die Degradation der Gewebe.

Erkenntnisse zu gebleichten Leinwänden

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden erstmals die Auswirkungen der historischen Rasenbleiche auf die Degradation und das hygrische Verhalten von Leinwänden untersucht. Die Reduktion der Kettenlänge der Cellulose durch das Bleichen ist erheblich und betrug rund 50 %. Dadurch lässt sich erklären, dass die augenscheinlich gebleichten Bildträger der Wandbespannung aus dem Herrenhaus Ermlitz eine so hohe Fragilität und Brüchigkeit aufweisen.

Die Rasenbleiche führt zu einer deutlichen Abnahme der in den Leinwänden gebundenen Feuchte. Dabei konnten Unterschiede festgestellt werden, ob eine Leinwand während der Rasenbleiche mit Wasser oder mit Lauge befeuchtet wurde. Das Befeuchten mit einer Lauge reduzierte die Feucheaufnahme weit weniger als das Befeuchten mit Wasser.

Erkenntnisse zum Trocknungsverhalten von Leinwänden

Im Rahmen der Versuche zur NIR-Spektroskopie ergaben sich interessante Beobachtungen hinsichtlich des Trocknungsverhaltens von Leinwänden. Innerhalb einer Minute verloren die Gewebe bei einer Temperatur von 60 °C mindestens die Hälfte ihrer gebundenen Feuchte. Im Falle des dünnsten Gewebes lag der Feuchtezuschlag nur noch bei 1 %. Temperaturen von 60 —70 °C kommen durchaus bei Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen am Bildträger

vor, sodass in diesem Zusammenhang mit dem vollständigen Trocknen der Bildträger gerechnet werden muss, mit den entsprechenden Einflüssen auf die Degradation der Leinwand

Erkenntnisse zur Aufnahme von Feuchte degradierter Leinwände

Durch die Erfassung der Gleichgewichtsfeuchte an den künstlich gealterten Leinwänden konnte bestätigt werden, dass die Menge der aufgenommenen Feuchte im Zuge der Alterung der Leinwand abnimmt. Daraus lässt sich jedoch nicht ableiten, dass degradierte Leinwände grundsätzlich weniger Feuchte aufnahmen als neue. Dies zeigten die Ergebnisse der historischen Bildträger. Teilweise nahmen diese mehr Feuchte auf als die neuen Leinwände.
Im Vergleich zu ungespannten Geweben nahmen während der klimatischen Alterung mit zyklisch schwankender Umgebungsfeuchte aufgespannte Gewebe mehr Feuchte auf. Als Ursache werden Veränderung von Zwischen- und Hohlräumen im Gewebe angenommen, was jedoch anhand der vorliegenden Daten nicht beurteilt werden kann.
Der Vergleich der Menge der aufgenommenen Feuchte unterschiedlicher Proben musste in Bezug auf einen konkreten Bereich der Umgebungsfeuchte erfolgen. Ob eine Leinwand viel oder wenig Feuchte aufnimmt, kann sich abhängig von Bindungsart im Mono- oder Multilayer bzw. als freies und kapillares Wasser unterscheiden.

Ein direkter Zusammenhang zwischen C. I. und der Gleichgewichtsfeuchte konnte anhand der vorliegenden Ergebnisse nicht nachgewiesen werden. In diesem Zusammenhang muss auf die Schwierigkeiten in der Anwendung der Bestimmungsmethode hingewiesen werden. Darüber hinaus werden durch die Messung des Kristallinitätsindexes die Verhältnisse zwischen amorphen und kristallinen Bereichen beschrieben, für die Aufnahme von Feuchte spielt jedoch auch die Größe der einzelnen Micellen eine Rolle, weil auch an der Oberfläche der Micellen Wassermoleküle gebunden werden können. Aus diesem Grund können Materialien des gleichen C. I. durchaus unterschiedliche Werte der Gleichgewichtsfeuchte aufweisen.

Ein Zusammenhang zwischen der Kettenlänge der Cellulose und der Gleichgewichtsfeuchte konnte für den unteren Bereich der Umgebungsfeuchten (40 und 60 %rF) hergestellt werden. Höhere Werte der Kettenlänge, welches auf die neuen Gewebe zutrifft, zeigten tendenziell höhere Werte des Feuchtezuschlags. Dieses Ergebnis entspricht nicht der im theoretischen Teil formulierten Theorie, dass mit abnehmender Kettenlänge die Sorptionsfähigkeit zunimmt.

Anhand der Ergebnisse des experimentellen Teils konnten keine eindeutigen Zusammenhänge zwischen dem molekularen und supramolekularen Zustand der Cellulose und der Gleichgewichtsfeuchte der Leinwand hergestellt werden. Es ist möglich, dass für die Höhe der Gleichgewichtsfeuchte weniger der Zustand der Cellulose einflussgebend ist, die sich in der Menge der Wassermoleküle im Mono- und Multilayer bemerkbar macht, sondern mehr die Beschaffenheit der Zwischen- und Hohlräume auf den unterschiedlichen Ebenen. Dies würde erklären, warum sich der Zustand der Cellulose nicht unmittelbar in der Gleichgewichtsfeuchte

abbildet. Es würde auch die Unterschiede zwischen gespannten und nicht gespannten Geweben erklären. Dafür spricht auch, dass die Gleichgewichtsfeuchten in den hohen Bereichen der Umgebungsfeuchte die größten Unterschiede aufweisen. Zur Verifizierung dieses Ansatzes wären weiterführende Untersuchungen mit bildgebenden Verfahren wie dem VP-REM und der Nano-CT vielversprechend. Dass sich beide Verfahren dafür eignen, wurde in Vorversuchen im Rahmen dieser Arbeit belegt.

8 Schlussbemerkung

Der Einstieg in die Beschäftigung mit dem hygrischen Verhalten der Leinwand, als Bildträger eines Leinwandgemäldes, hätte nicht vermuten lassen, dass die sich aus der Auseinandersetzung mit dem Thema entwickelnden Experimente, die Untersuchung der Leinwand auf der kleinsten strukturellen Ebene zum Gegenstand haben würde. Das im Rahmen dieser Arbeit erstmalige Zusammentragen des Wissens aus unterschiedlichen Disziplinen zu diesem Thema, deckte jedoch schon auf dieser Ebene grundlegende Fragestellungen auf, die es zu klären galt, um in dieses etwas undurchsichtige Feld mehr Klarheit zu bringen. Es erschien sinnvoll, zunächst zu beleuchten, wie viel Feuchte überhaupt von einer Leinwand aufgenommen werden kann, bevor untersucht wird, wie sich diese Feuchteaufnahme im Leinwandgemälde äußert und was sie im Material bewirkt.

Es hat sich gezeigt, dass die Menge der aufgenommenen Feuchte je nach Art der Leinwand und ihres Zustandes schwankt. Aufgrund dieser Variationen ist es sinnvoll, Untersuchungen und Beobachtungen zum hygrischen Verhalten von Leinwänden nicht nur auf die jeweilige Umgebungsfeuchte zu beziehen, sondern auf die tatsächliche Materialfeuchte. Dies kann z. B. in situ durch den Einsatz eines NIR-Spektrometers erfolgen. Um diese Technik weiter zu qualifizieren sollten weitere Referenzwerte, vor allem in Bezug auf gealterte Leinwände erfasst werden. Durch die Messung der Materialfeuchte können die Auswirkungen von Klimaschwankungen Objektspezifisch interpretiert werden.

Dem Restaurator stehen bisher kaum objektive Grundlagen zur Verfügung, um für den Einsatz von Feuchte an der Leinwand über Menge und Art der einzubringenden Feuchte zu entscheiden. Aus diesem Grund ist es dringend angeraten, die Forschung zum hygrischen Verhalten von Leinwänden und Leinwandgemälden weiter fort zu führen. Diese Forschung sollte in diesem Zusammenhang ein besonderes Augenmerk auf die Zusammensetzung und den Aufbau der zu untersuchenden Leinwände legen. Für die Erfassung relevanter Merkmale gilt es einen Konsens zum methodischen Vorgehen zu finden. Um das grundlegende Verhalten von Leinwänden besser zu verstehen ist es lohnenswert sich den folgenden Fragestellungen in Zukunft zu widmen:

Die Untersuchung des Trocknungsverhaltens von Leinwänden während des Einsatzes von Wärme im Zuge von Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen.

Die Erfassung der Gleichgewichtsfeuchte bei unterschiedlichen Temperaturen.

Um das Verhalten von gebleichten Leinwänden besser zu verstehen, sollten gebleichte Leinwände einer künstlichen Alterung unterzogen werden und die Auswirkungen der Degradation auf die durch das Bleichen ohnehin schon geschädigten Leinwände zu beleuchten. Der veränderte Zustand kann dann mit dem hygrischen Verhalten in Zusammenhang gebracht werden.

Ein umfassendes Forschungsfeld steht der Konservierungswissenschaft mit der Untersuchung von veränderten Eigenschaften der Leinwände aufgrund wechselnder Materialfeuchten bevor. Restauratoren befeuchten z. B. Leinwände bevor sie gedehnt werden sollen. Aber wie sich mechanisch/physikalische Eigenschaften einer degradierten Leinwand durch Änderungen in der Materialfeuchte auswirken, wurde bislang nicht untersucht.

Durch bildgebende Verfahren wie dem variable pressure-Rasterelektronenmikroskop oder Nano-Computertomografie können in Zukunft Dimensionsänderungen aufgrund wechselnder Umgebungsfeuchten auf den unterschiedlichen strukturellen Ebenen erfasst werden. Möglicherweise lassen sich auf diesem Weg auch Zwischen- und Hohlräume der Leinwände charakterisieren und Beobachtungen während des Quellen und Schwindens aufzeichnen.

Anhang

A Tabellen

Tabelle A.1: Berechnung der GVZ nach Formel 6.1, S. 225, aus Werten der relativen und spezifischen Viskosität bei 20 °C von Backes 2005, S. 138. Werte von BACKES in grau, im Rahmen der vorliegenden Arbeit berechnete Werte in schwarz. Die GVZ wurde mit und ohne Berücksichtigung des Feuchtezuschlags berechnet.

	Flachs unbehandelt	**Flachs gewaschen**	**Flachs unbehandelt**	**Flachs gewaschen**
Masse Probe [g]	0,02	0,02	0,02	0,02
Feuchtezuschlag u [%]	0	0	7,5	7,5
Menge Lösungsmittel [ml]	50	50	50	50
Konzentration c [g/ml]	0,0004	0,0004	0,00037	0,00037
relative Viskosität η_{rel}	1,8039	1,8092	1,8039	1,8092
spezifische Viskosität η_{spez}	0,8039	0,8092	0,8039	0,8092
Viskositätszahl	2010	2023	2173	2187
Grenzviskositätszahl η [ml/g]	1579	1588	1707	1716

Tabelle A.2: Feuchtezuschlag nass gesponnener, ungebleichter und gebleichter Leinengarne der Garnnummer Nm 18,2 (NeL 30) während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 %rF und etwa 20 °C aus Scheithauer 1941, S. 67.

Zeit	**Feuchtezuschlag [%]**			
1936	Roh	Mech. und chem. aufgeschlossener Grünflachs	3/4 gebleicht	4/4 gebleicht
16. Januar	6,92	6,57	6,30	6,25
17. Januar	8,21	7,97	7,58	7,28
18. Januar	9,22	8,86	8,28	8,16
20. Januar	9,94	9,37	8,80	8,64
21. Januar	10,01	9,45	8,88	8,72
23. Januar	10,01	9,45	8,80	8,64
25. Januar	10,01	9,45	8,88	8,72
27. Januar	10,01	9,45	8,88	8,72

Tabelle A.3: Feuchtezuschlag nass gesponnener roher Flachsgarne unterschiedlicher Garnnummer während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 % rF und etwa 20 °C aus Scheithauer 1941, S. 68.

Zeit	**Feuchtezuschlag [%]**			
1936	Nm 15,2 (Ne_L 25)	Nm 18,2 (Ne_L 30)	Nm 24,2 (Ne_L 25)	Nm 36,4 (Ne_L 25)
16. Januar	6,97	6,92	6,82	6,79
17. Januar	8,29	8,21	8,07	8,08
18. Januar	9,34	9,22	9,12	9,04
20. Januar	9,95	9,94	9,79	9,75
21. Januar	10,05	10,01	9,90	9,88
23. Januar	10,00	10,01	9,90	9,84
25. Januar	10,05	10,01	9,90	9,88
27. Januar	10,05	10,01	9,90	9,88

Tabelle A.4: Feuchtezuschlag trocken gesponnener roher Werggarne unterschiedlicher Garnnummer während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 % rF und etwa 20 °C aus Scheithauer 1941, S. 68.

Zeit	**Feuchtezuschlag [%]**	
1936	Nm 3,6 (Ne_L 6)	Nm 6,1 (Ne_L 10)
16. Januar	7,23	7,09
17. Januar	8,81	8,51
18. Januar	9,59	9,22
20. Januar	10,11	9,94
21. Januar	10,37	10,16
23. Januar	10,11	10,16
25. Januar	10,37	10,16
27. Januar	10,37	10,16

Tabelle A.5: Feuchtezuschlag nass gesponnener roher Flachs- und Werggarne gleicher Garnnummer während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 % rF und etwa 20 °C aus Scheithauer 1941, S. 68.

Zeit	**Feuchtezuschlag [%]**			
1936	Flachsgarn Nm 15,2 (Ne_L 25)	Flachsgarn Nm 18,2 (Ne_L 30)	Werggarn Nm 15,2 (Ne_L 25)	Werggarn Nm 18,2 (Ne_L 30)
16. Januar	6,92	6,97	6,87	6,89
17. Januar	8,21	8,29	8,05	8,13
18. Januar	9,22	9,34	9,14	9,17
20. Januar	9,94	9,95	9,69	9,82
21. Januar	10,01	10,05	9,85	9,95
23. Januar	10,01	10,00	9,85	9,95
25. Januar	10,01	10,05	9,85	9,95
27. Januar	10,01	10,05	9,85	9,95

Tabelle A.6: Feuchtezuschlag nass gesponnenes rohes Flachsgarn Nm 18,2 (Ne_L 30) während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 % rF und 80 % rF und etwa 20 °C aus Scheithauer 1941, S. 70.

Zeit	**Feuchtezuschlag [%]**		
1936	Einlagerung in 65 % rF	Einlagerung in 80 % rF	Rücklagerung in 65 % rF
16. Januar	6,92	6,94	
17. Januar	8,21	9,23	
18. Januar	9,22	10,26	
20. Januar	9,94	11,37	
21. Januar	10,01	11,59	
23. Januar	10,01	11,80	
25. Januar	konstant	11,80	
27. Januar		konstant	
13. Februar			11,80
14. Februar			10,48
15. Februar			10,19
17. Februar			10,03
18. Februar			10,12
19. Februar			10,03
22. Februar			konstant

Tabelle A.7: Feuchtezuschlag nass gesponnenes rohes Flachsgarn Nm 18,2 (Ne_L 30) während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 % rF und 30 % rF und etwa 20 °C aus Scheithauer 1941, S. 71.

Zeit	**Feuchtezuschlag [%]**		
1936	Einlagerung in 65 % rF	Einlagerung in 30 % rF	Rücklagerung in 65 % rF
16. Januar	6,92	6,91	
17. Januar	8,21	6,10	
18. Januar	9,22	5,95	
20. Januar	9,94	5,95	
21. Januar	10,01	konstant	
23. Januar	10,01		
25. Januar	konstant		
27. Januar			
13. Februar		5,95	5,95
14. Februar			7,88
15. Februar			8,84
17. Februar			9,66
18. Februar			9,87
19. Februar			9,94
22. Februar			10,02
25. Februar			10,02
29. Februar			konstant

Tabelle A.8: Feuchtezuschlag nass gesponnenen rohen Flachsgarnes Nm 18,2 (NeL 30) nach verschiedener Vortrocknung während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 %rF und 20 °C, der Feuchtezuschlag bezieht sich auf das Trockengewicht in % nach Vortrocknung, aus Scheithauer 1941, S. 72.

Lagerungs-stunden	**Feuchtezuschlag [%] bei unterschiedlicher Vortrocknung**					
	--	30 °C/48 h	55 °C /12 h	80 °C /3 h	105 °C / 3 h	--
0,0	7,32	6,06	5,10	2,64	0,00	7,64
1,0	9,38	9,09	8,92	8,05	5,61	9,22
2,5	10,01	9,73	9,59	9,18	8,23	9,98
5,0	9,97	10,07	10,06	9,81	9,02	10,03
10,0	10,03	10,01	10,03	10,01	9,60	10,04
20,0		10,3	10,04	10,05	9,73	konstant
32,0		konstant	konstant	10,03	9,94	
44,0				konstant	9,96	
56,0					9,96	
					konstant	

Tabelle A.9: Feuchtezuschlag und Volumenszunahme von Flachsfasern nach Chakravarty 1971, S. 320.

Feuchtezsuchlag [%]	Volumenszunahme [%]
0	0
2,5	2,3
5,8	6,1
7,5	7,9
9,5	9,6
16,5	17,9
21,5	23,2
27,0	29,5

Tabelle A.10: Feuchtezuschlag [%] für entfetteten Flachs publiziert von Hönig 1918, S. 159.

rF [%]	Temperatur [°C]	Gehechelter Flachs						Flachsgarne			
		Wasserröste		Tauröste		Überröstet		Trockengespinst		Nassgespinst	
90	25,1	17,01	16,89	15,91	16,41	19,62	20,30	16,42	16,02	-	15,36
84	27,7	12,36	12,48	12,41	12,39	16,51	17	13,16	12,85	-	12,06 (50 % rF)
68	28,4	9,61	9,69	9,62	9,38	13,35	12,76	10,23	9,99	9,91	9,66
55	25,1	7,66	7,73	7,82	7,38	11,06	10,66	8,09	7,94	7,52	7,34
43	29,1	6,68	6,83	6,93	6,49	10,28	9,95	7,28	7,08	6,93	6,69

Hönig 1918, S. 159: „Durch diese Entfettung werden die hygroskopischen Eigenschaften wie folgt beeinflusst: Beim wassergerösteten Flachs fällt durch die Entfettung der Wassergehalt bei den hohen Feuchtigkeitsgehaltsstufen um rund 1,5—2 %, bei den mittleren um 1 % und bei den niederen um 0,5 %. Beim taugerösteten Flachs können wir für dieselben drei Stufen 1,5—2 %, 0,5—1 % und rund 1 % setzen. Beim überrösteten gehechelten Flachs bedingt aber die Entfettung für die hohen und mittleren Feuchtigkeitsgehaltsstufen eine Zunahme des Wassergehaltes von rund 2 %, für die niederen Stufen von rund 1,5 %. Beim Trockengarn bewirkt die Entfettung für die hohen Feuchtigkeitsgehaltsstufen keinerlei bemerkenswerte Veränderung, bei den mittleren und niederen Stufen steigt der Wassergehalt nach der Entfettung um 0,5—1 %. Beim Nassgespinst finden wir bei den hohen Stufen gleichfalls keine Veränderung, bei den mittleren eine solche, die zwischen 0,25 und 0,75 % schwankt."

Tabelle A.11: Berechnung der Größenveränderung der Farbfilme durch Sorption. Berechnet aus den gemessenen Daten von Mecklenburg 1982, Abbildung 3a bis 3d, ohne Seitenzahl.

Farbfilm 36 Monate alt und Leimfilm	Größe vor Sorption [cm]	Größe nach Sorption [cm]	Differenz [cm]	Zunahme Dimension [%]
Titandioxid in Leinöl	70,7	70,93	0,23	0,33
Bleiweiß in Leinöl	69,6	69,85	0,25	0,36
Gebrannte Umbra in Leinöl	70,53	71,78	1,25	1,77
Synthetisches Azo-Pigment in Diestelöl	71,13	72,39	1,26	1,77
Hasenhautleim	68,63	70,39	1,76	2,57
Gewebe, Kettrichtung	70,9	70,6	0,3	0,423

A.1 Definitionen

Nm

Bezeichnung für die Garnfeinheit im metrischen System. Es handelt sich um eine im Prinzip veraltete Einheit, die in der Textilindustrie jedoch nach wie vor in Gebrauch ist.
Die *Nm*-Feinheit ist die Länge *l* eines Garns in m, bezogen auf sein Gewicht *m* in g:[795]

$$Nm = \frac{l}{m} \tag{A.1}$$

4 Nm bedeuten, dass 4 Meter eines Garns 1 Gramm wiegen. Kleinere Zahlenwerte kennzeichnen gröbere Garne. Ein Zwirn Nm 8,5/2 ist aus zwei Garnen Nm 8,5 verzwirnt.

Ne_L

Englische Bezeichnung für die Feinheit von Leinengarnen.
1 Ne_L steht für 0,604772 Meter Leinengarn pro 1 Gramm.

795 Thomas/Reumann 2000b, S. 252.

B Anlagen zum experimentellen Teil

B.1 Charakterisierung der verwendeten Gewebe

B.1.1 Neues Flachsgewebe N1, Herstellerangaben

Bezugsadresse: Holstein Flachs GmbH, Egon Heger, Alte Ziegelei, 23795 Mielsdorf
Kaufdatum: 11.05.2010
Flachsgewebe Art. 1163 roh
Leinwandbindung, Flächengewicht: 350g/qm
Anbau Flachs, Sorte Ariane. Zertifizierter Ökologischer Anbau in Ostholstein/Schwienkuhlen.
Flächengröße: 12ha
Ernteverfahren:
Tauröste (Flachs Mitte Juli aus der Erde gezogen und geordnet auf Feld abgelegt, insgesamt drei mal gewendet um von Pilzen induziertem Aufschlussprozess zu homogenisieren, Anfang September zu Ballen gerollt und unter Dach gelagert)
Faseraufarbeitung:
Rein mechanische Trennung von Langfasern, Kurzfasern (Werg) und Holzteilen (Schäben) auf Schwinganlage Fa. Depoortere. Rein mechanische Reinigung/Trennung Kurzfasern von anhaftenden Holzteilen auf Wergreinigung von Fa. Charlé.
Spinnen:
Langfaser wurde in Fa. Füssener Textil AG zu Hechelband und Hechelwerg verarbeitet. Hechelband wurde zu feinen Garnen versponnen, Hechelwerg wurde mit gereinigtem Schwungwerg aus Faserausarbeitung im Verhältnis ca. 1:1 vermischt.
Hechelwerg und Schwungwerg mit Karden zu Band verarbeitet, gekämmt, doubliert und verstreckt und mit Flyer zu Vorgarn verdreht. Vorgarn auf spezielle gelochte Konen gespult und in Kochapparat mit Natriumhydroxid/Soda und Seife „vorgarngekocht".
Vorgarn in nassem Zustand zu Nm 8,5 versponnen (dabei durch Wasserbad mit ca. 40°C gezogen), Garn getrocknet und zu Nm 8,5/2 verzwirnt.[796]
Weben
Kettfaden mit Stärke geschlichtet, Schußfaden unbehandelt.

796 Zur Definition Nm siehe Anhang A.1, S. 299.

B.1.2 Künstliche Alterung

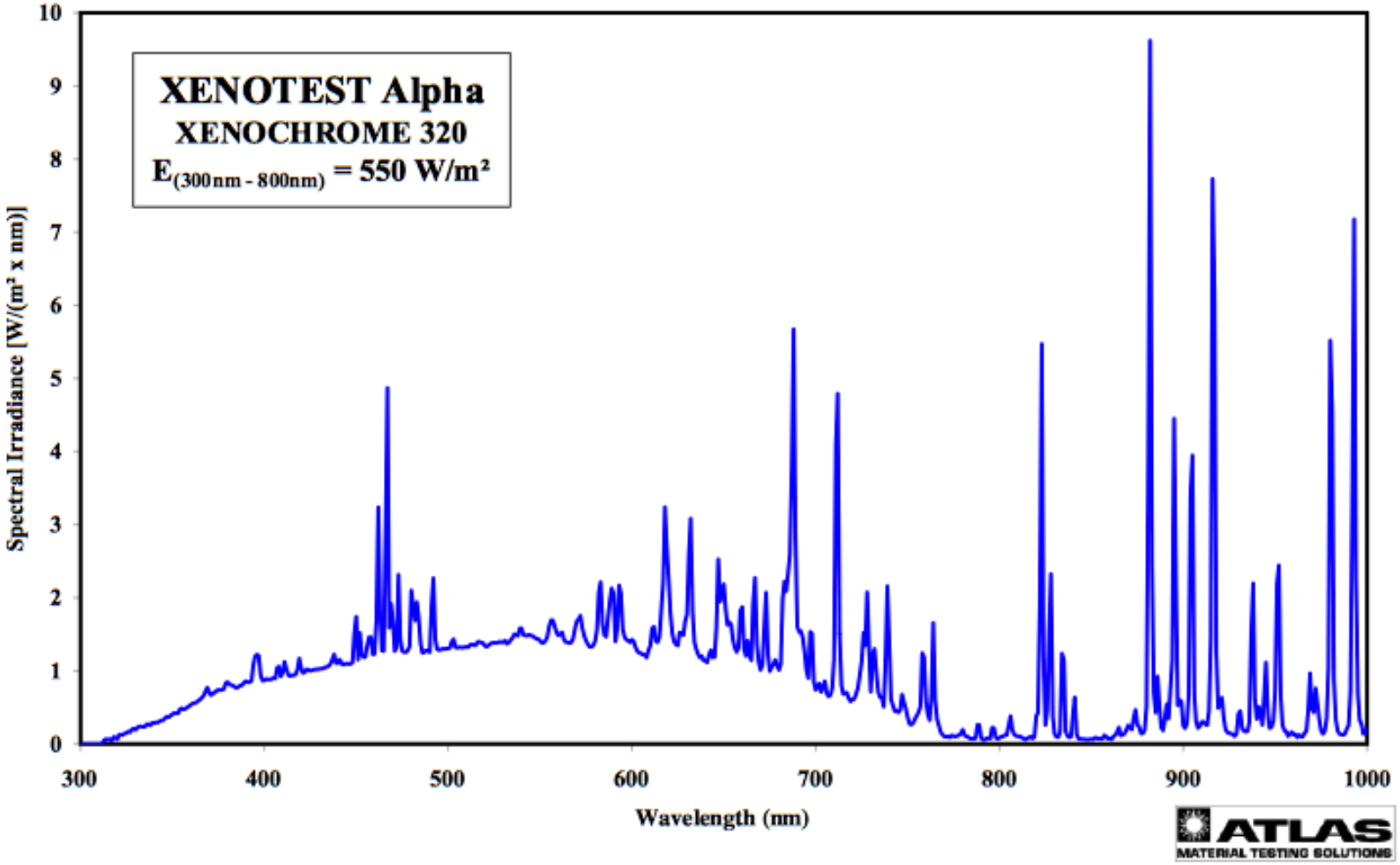
Belichtung

Blaue Lichtechtheitstypen aus Wolle:
Lichtechtheitstypen der Deutschen Echtheitskommission aus Wollgewebe, entsprechend ISO 105-B01 bis B06. Typen 1 bis 8.
Bezogen über Beuth Verlag GmbH, 10772 Berlin.

Belichtung mit der Xenonbogenlampe:
Durchführung am Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden e.V.
Hohe Straße 6
01069 Dresden

Gerät: Xenotest Alpha (Atlas Material Testing GmbH)
Filtersystem: Suprax-Zylinder und XENOCHROME 320 (Simulation Sonnenlicht hinter Fensterglas)

Größe der Gewebestreifen: 45 x 150 mm
Größe des belichteten Bereiches: 45 x 110 mm


XENOTEST Alpha
XENOCHROME 320
E(300nm - 800nm) = 550 W/m²
Spectral Irradiance [W/(m² x nm)]
0
1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
300
400
500
600
700
800
900
1000
Wavelength (nm)
ATLAS
MATERIAL TESTING SOLUTIONS

Klimatische Alterung

Gerät: Klimaschrank Vötsch VC 0034
Zeitliche Temperaturschwankung in Nutzraummitte ± 0,1 bis ± 0,3 K
Temperaturabweichung räumlich ± 0,5 bis ± 1 K
Feuchteschwankung zeitlich in Nutzraummitte ± 1 bis ± 3 % rF

Externe Überprüfung der Umgebungsbedingungen im Klimaschrank:
Universalmessgerät mit Datenlogger: Almemo® 2590-4S mit Digitalsensor für Feuchte und Temperatur: FH AD 46-0.
Auflösung Feuchte: 0,1 %
Fa. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH
Eichenfeldstraße 1, 83607 Holzkirchen

Protokoll zur Aufspannung der Gewebe während der klimatischen Alterung

Aufgespannt vor Beginn der klimatischen Alterung, nach der holländischen Spannmethode auf einen Holzrahmen.
N1-A-K4-g: Nachspannen des Gewebes jeweils in Schuss- und Kettrichtung:
Nach 2 Tagen, zwei mal jeweils nach 14 Tagen, noch ein mal nach 2 Tagen.
N1-A-K10-g: Nachspannen des Gewebes jeweils in Schuss- und Kettrichtung: Nach 2 Tagen, vier mal jeweils nach 14 Tagen.

B.2 Gewebestrukturanalysen und Informationen der verwendeten Gewebe und historischen Proben

N1

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	1,0	
	Schuss	0,7	
Drehrichtung Garn	Kette	S-Zwirn aus Z-Garnen Nm 8,5/2	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	nicht bestimmt	
	Schuss	65,6	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	8,50	
	Schuss	9,00	
Füllung [%]	Kette	84,53	
	Schuss	63,27	
	Gewebe	94,32	
Flächengewicht [g/m²]*	Gewebe	350	*Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,84	0,82		78,03
1,21	0,92		68,22
1,00	0,75		61,04
1,06	0,79		66,75
1,11	0,81		62,21
0,72	0,65		68,96
0,78	0,69		63,83
0,96	0,53		65,96
0,95	0,40		61,05
1,33	0,63		59,91
0,68	0,70		
0,78	0,67		
0,91	0,47		
1,37	0,53		
1,05	0,71		
1,00	0,78		
0,98	0,97		
1,13	0,64		
0,99	0,83		
1,04	0,77		
0,18	0,14		

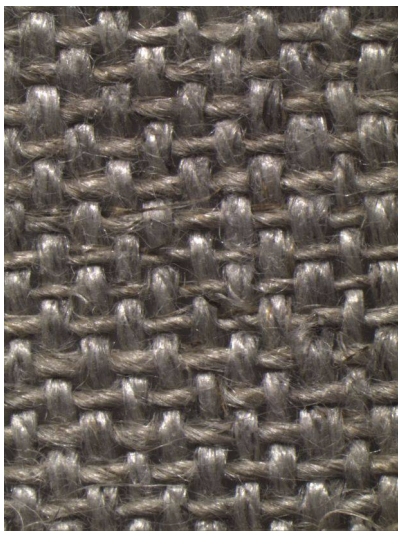


Abbildung B.1: Detail N1.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Schuss

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	85,00
Schuss	90,00

N1-A-TL

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	1,0	
	Schuss	0,7	
Drehrichtung Garn	Kette	S-Zwirn aus Z-Garnen Nm 8,5/2	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	nicht bestimmt	
	Schuss	63,6	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	8,80	
	Schuss	8,88	
Füllung [%]	Kette	91,21	
	Schuss	65,28	
	Gewebe	96,95	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,74	0,69		65,14
1,08	0,57		69,64
1,04	0,68		71,27
1,40	0,77		57,43
0,97	0,82		64,28
0,82	0,77		62,54
1,10	0,75		59,06
0,74	0,79		64,20
1,37	0,58		59,70
0,93	0,72		63,20
1,08	0,69		
1,10	0,77		
1,01	0,80		
0,83	0,77		
1,08	0,80		
1,23	0,82		
1,04	0,79		
1,13	0,57		
0,72	0,79		
1,32	0,77		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	88,00
Schuss	88,75



Abbildung B.2: Detail N1-A-TL.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Kette

N1-A-X84

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	0,9	
	Schuss	0,7	
Drehrichtung Garn	Kette	S-Zwirn aus Z-Garnen Nm 8,5/2	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	nicht bestimmt	
	Schuss	66,9	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	8,25	
	Schuss	8,88	
Füllung [%]	Kette	77,92	
	Schuss	64,03	
	Gewebe	92,06	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
1,08	0,74		67,70
0,90	0,68		69,91
0,98	0,63		67,29
1,07	0,75		68,51
0,78	0,95		66,39
0,95	0,55		60,82
0,90	0,96		63,15
1,10	0,65		67,57
1,13	0,83		67,39
0,90	0,76		70,70
0,98	0,63		
0,94	0,80		
0,93	0,75		
0,68	0,66		
0,90	0,53		
1,00	0,80		
0,96	0,80		
0,85	0,60		
0,95	0,75		
0,91	0,61		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	82,50
Schuss	88,75



Abbildung B.3: Detail N1-A-X84.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Schuss.

N1-A-X168

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	1,0	
	Schuss	0,7	
Drehrichtung Garn	Kette	S-Zwirn aus Z-Garnen Nm 8,5/2	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	nicht bestimmt	
	Schuss	66,9	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	8,45	
	Schuss	9,00	
Füllung [%]	Kette	83,57	
	Schuss	60,89	
	Gewebe	93,57	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,96	0,61		70,30
1,01	0,69		68,34
0,79	0,64		66,61
0,85	0,68		60,95
0,85	0,41		72,11
0,90	0,90		63,18
0,86	0,62		69,03
1,13	0,65		68,33
1,17	0,88		69,16
1,01	0,68		60,84
1,22	0,76		
1,37	0,71		
0,90	0,77		
0,81	0,52		
1,01	0,59		
1,05	0,78		
0,85	0,56		
1,30	0,68		
0,76	0,79		
0,98	0,61		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	84,50
Schuss	90,00



Abbildung B.4: Detail N1-A-X168.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Kette.

N1-A-K4-u

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	1,0	
	Schuss	0,6	
Drehrichtung Garn	Kette	S-Zwirn aus Z-Garnen Nm 8,5/2	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	nicht bestimmt	
	Schuss	61,4	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	8,60	
	Schuss	8,90	
Füllung [%]	Kette	86,47	
	Schuss	57,58	
	Gewebe	94,26	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,92	0,55		66,46
1,07	0,74		60,47
0,88	0,49		58,03
0,89	0,88		57,48
0,89	0,47		51,76
1,12	0,58		64,89
1,25	0,64		64,82
1,06	0,56		64,80
1,06	0,54		63,78
0,97	0,44		61,24
1,26	0,64		
0,99	0,64		
1,04	0,80		
0,85	0,77		
0,98	0,71		
0,91	0,58		
1,22	0,77		
0,84	0,58		
0,92	0,77		
0,99	0,79		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	86,00
Schuss	89,00



Abbildung B.5: Detail N1-A-K4-u.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Schuss.

N1-A-K4-g

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	1,0	
	Schuss	0,7	
Drehrichtung Garn	Kette	S-Zwirn aus Z-Garnen Nm 8,5/2	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	nicht bestimmt	
	Schuss	64,4	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	8,15	
	Schuss	8,20	
Füllung [%]	Kette	78,40	
	Schuss	54,33	
	Gewebe	90,14	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,83	0,69		69,29
1,01	0,60		73,72
0,94	0,71		58,83
0,92	0,79		67,83
0,98	0,65		60,35
1,22	0,54		56,43
0,65	0,64		
1,01	0,82		
0,82	1,08		
0,95	0,67		
1,29	0,42		
0,75	0,59		
0,91	0,83		
1,00	0,73		
0,88	0,59		
0,98	0,47		
1,24	0,65		
1,00	0,69		
1,03	0,49		
0,83	0,60		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	81,50
Schuss	82,00



Abbildung B.6: Detail N1-A-K4-g.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Schuss.

N1-A-K10-u

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	1,0	
	Schuss	0,8	
Drehrichtung Garn	Kette	S-Zwirn aus Z-Garnen Nm 8,5/2	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	nicht bestimmt	
	Schuss	65,3	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	8,25	
	Schuss	8,80	
Füllung [%]	Kette	82,01	
	Schuss	66,57	
	Gewebe	93,98	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,91	0,69		62,43
1,26	0,68		66,12
0,90	0,50		67,27
1,01	0,86		
0,94	0,69		
1,10	0,70		
0,97	0,81		
1,42	0,94		
0,91	0,78		
0,79	0,81		
0,83	0,75		
0,90	0,79		
1,16	0,61		
0,72	0,80		
0,85	0,77		
1,05	0,74		
1,01	0,83		
1,12	0,94		
0,99	0,83		
1,04	0,61		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	82,50
Schuss	88,00



Abbildung B.7: Detail N1-A-K10-u.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Kette.

N1-A-K10-g

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	0,9	
	Schuss	0,7	
Drehrichtung Garn	Kette	S-Zwirn aus Z-Garnen Nm 8,5/2	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	nicht bestimmt	
	Schuss	63,0	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	8,00	
	Schuss	8,25	
Füllung [%]	Kette	71,44	
	Schuss	55,23	
	Gewebe	87,21	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,97	0,68		60,82
0,86	0,68		62,48
0,64	0,51		57,65
1,01	0,64		65,88
0,87	0,66		61,05
0,84	0,67		62,72
0,81	0,82		71,51
0,89	0,77		65,91
1,07	0,60		61,78
0,90	0,67		59,93
0,93	0,60		
0,73	1,04		
1,13	0,88		
0,86	0,55		
0,90	0,64		
0,83	0,69		
0,77	0,52		
1,12	0,43		
0,77	0,73		
0,96	0,61		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	80,00
Schuss	82,50

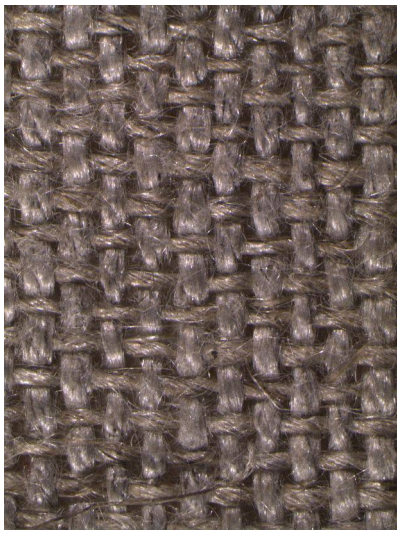


Abbildung B.8: Detail N1-A-K10-g.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Schuss.

N1-A-TL-K4-u

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	1,0	
	Schuss	0,7	
Drehrichtung Garn	Kette	S-Zwirn aus Z-Garnen Nm 8,5/2	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	nicht bestimmt	
	Schuss	66,4	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	8,55	
	Schuss	9,00	
Füllung [%]	Kette	84,56	
	Schuss	66,11	
	Gewebe	94,77	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,78	0,79		66,91
1,03	0,70		69,12
1,04	0,74		68,48
1,13	0,54		64,45
1,19	0,63		60,78
1,10	0,85		69,85
0,86	0,90		67,15
0,92	0,70		64,37
1,18	0,71		67,34
0,83	0,88		65,48
0,96	0,70		
1,10	0,93		
1,15	0,91		
1,00	0,72		
0,96	0,63		
0,90	0,72		
0,83	0,71		
0,93	0,72		
0,86	0,60		
1,03	0,61		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	85,50
Schuss	90,00



Abbildung B.9: Detail N1-A-TL-K4-u.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Kette.

N1-A-X84-K4-u

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	1,0	
	Schuss	0,7	
Drehrichtung Garn	Kette	S-Zwirn aus Z-Garnen Nm 8,5/2	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	nicht bestimmt	
	Schuss	67,3	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	8,40	
	Schuss	8,65	
Füllung [%]	Kette	81,61	
	Schuss	62,93	
	Gewebe	93,18	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
1,28	0,58		64,33
0,98	0,83		69,50
1,05	0,93		66,13
1,00	0,83		68,42
1,08	0,63		67,10
0,95	0,90		65,09
0,95	0,70		72,82
0,88	0,68		69,39
1,18	0,81		63,97
0,90	0,80		66,41
0,67	0,60		
0,92	0,53		
1,16	0,73		
0,98	0,80		
0,90	0,82		
1,03	0,62		
0,68	0,58		
1,01	0,75		
0,93	0,81		
0,90	0,62		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	84,00
Schuss	86,50



Abbildung B.10: Detail N1-A-X84-K4-u.

Bildbreite entspricht ca. 13 mm. Horizontal: Kette.

N1-A-X168-K4-u

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	1,1	
	Schuss	0,7	
Drehrichtung Garn	Kette	S-Zwirn aus Z-Garnen Nm 8,5/2	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	nicht bestimmt	
	Schuss	63,1	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	8,25	
	Schuss	9,00	
Füllung [%]	Kette	86,87	
	Schuss	63,45	
	Gewebe	95,20	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
1,37	0,74		63,62
0,92	0,58		57,68
0,92	0,81		67,35
1,10	0,83		66,87
1,06	0,70		64,31
0,97	0,49		59,16
1,24	0,74		57,54
1,24	0,68		67,79
0,96	0,50		66,92
1,11	0,83		60,04
1,11	0,62		
1,25	0,73		
0,93	0,75		
1,01	0,79		
0,90	0,72		
1,07	0,71		
0,97	0,63		
0,96	0,95		
1,12	0,57		
0,85	0,73		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	82,50
Schuss	90,00



Abbildung B.11: Detail N1-A-X168-K4-u.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm. Horizontal: Kette.

N2

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	0,4	
	Schuss	0,3	
Drehrichtung Garn	Kette	Z	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	71,2	
	Schuss	70,1	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	17,20	
	Schuss	18,20	
Füllung [%]	Kette	62,66	
	Schuss	54,04	
	Gewebe	82,84	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*aus Dornstädter 2011, S. 64.

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,27	0,16		
0,39	0,30		
0,41	0,38		
0,40	0,45		
0,29	0,34		
0,30	0,37		
0,33	0,31		
0,36	0,40		
0,39	0,31		
0,53	0,19		
0,34	0,27		
0,30	0,23		
0,31	0,26		
0,34	0,23		
0,28	0,20		
0,36	0,30		
0,40	0,28		
0,43	0,36		
0,44	0,37		
0,40	0,23		

Fadendichte pro 5 cm	
Kette	86,00
Schuss	91,00



Abbildung B.12: Detail N2.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm. Horizontal: Kette.

N2-B1

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	0,3	
	Schuss	0,3	
Drehrichtung Garn	Kette	Z	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	63,5	
	Schuss	64,6	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	17,60	
	Schuss	17,80	
Füllung [%]	Kette	59,33	
	Schuss	61,90	
	Gewebe	84,50	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*aus Dornstädter 2011, S. 64.

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,33	0,29		
0,29	0,33		
0,39	0,32		
0,29	0,33		
0,26	0,35		
0,31	0,42		
0,29	0,35		
0,37	0,35		
0,44	0,38		
0,31	0,40		
0,37	0,29		
0,29	0,28		
0,38	0,46		
0,40	0,31		
0,40	0,38		
0,34	0,41		
0,26	0,38		
0,35	0,21		
0,28	0,41		
0,40	0,32		

Fadendichte pro 5 cm	
Kette	88,00
Schuss	89,00

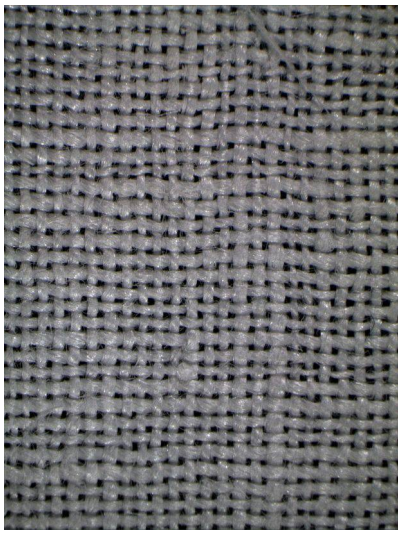


Abbildung B.13: Detail N2-B1.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Kette.

N3

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	0,5	
	Schuss	0,5	
Drehrichtung Garn	Kette	Z	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	73,0	
	Schuss	73,5	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	11,80	
	Schuss	11,40	
Füllung [%]	Kette	63,93	
	Schuss	52,33	
	Gewebe	82,80	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*aus Dornstädter 2011, S. 65.

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,49	0,36		
0,70	0,66		
0,49	0,51		
0,59	0,55		
0,56	0,43		
0,53	0,46		
0,49	0,31		
0,64	0,52		
0,56	0,50		
0,53	0,40		
0,39	0,41		
0,51	0,42		
0,44	0,33		
0,42	0,57		
0,48	0,41		
0,57	0,48		
0,71	0,58		
0,49	0,35		
0,71	0,52		
0,53	0,41		

Fadendichte pro 5 cm	
Kette	59,00
Schuss	57,00

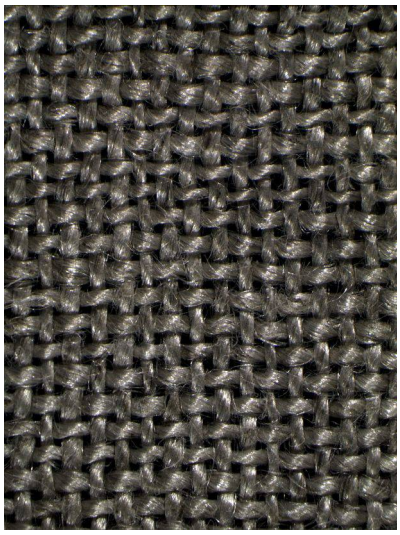


Abbildung B.14: Detail N3.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Kette.

N3-B1

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	0,5	
	Schuss	0,5	
Drehrichtung Garn	Kette	Z	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	65,6	
	Schuss	65,6	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	11,20	
	Schuss	11,80	
Füllung [%]	Kette	56,32	
	Schuss	53,84	
	Gewebe	79,84	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*aus Dornstädter 2011, S. 69.

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,56	0,56		
0,45	0,59		
0,45	0,45		
0,41	0,50		
0,47	0,51		
0,49	0,48		
0,44	0,45		
0,45	0,42		
0,53	0,50		
0,48	0,41		
0,49	0,47		
0,52	0,58		
0,48	0,43		
0,64	0,39		
0,67	0,28		
0,60	0,44		
0,50	0,37		
0,46	0,47		
0,45	0,31		
0,50	0,52		

Fadendichte pro 5 cm	
Kette	56,00
Schuss	59,00

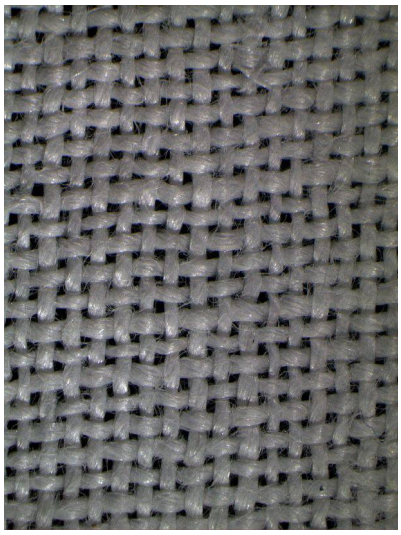


Abbildung B.15: Detail N3-B1.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Kette.

N3-B2

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	0,4	
	Schuss	0,5	
Drehrichtung Garn	Kette	Z	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	65,6	
	Schuss	65,6	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	11,40	
	Schuss	11,40	
Füllung [%]	Kette	51,02	
	Schuss	59,59	
	Gewebe	80,21	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*aus Dornstädter 2011, S. 64.

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,44	0,56		
0,48	0,76		
0,37	0,39		
0,34	0,62		
0,50	0,44		
0,47	0,47		
0,48	0,47		
0,46	0,52		
0,58	0,45		
0,45	0,59		
0,39	0,47		
0,49	0,44		
0,39	0,71		
0,51	0,49		
0,48	0,48		
0,45	0,46		
0,50	0,49		
0,39	0,54		
0,43	0,48		
0,37	0,63		

Fadendichte pro 5 cm	
Kette	57,00
Schuss	57,00

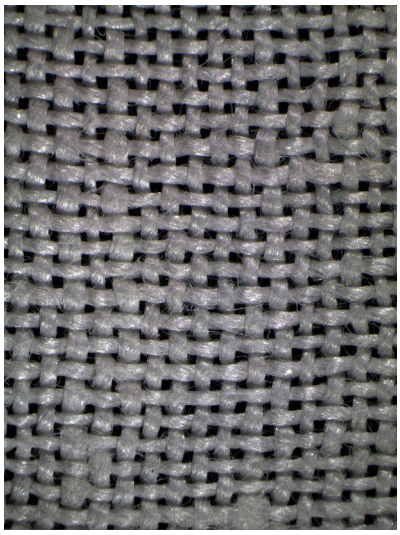


Abbildung B.16: Detail N3-B2.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Kette.

N4

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	0,5	
	Schuss	0,5	
Drehrichtung Garn	Kette	Z	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	70,5	
	Schuss	72,8	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	9,40	
	Schuss	9,50	
Füllung [%]	Kette	49,99	
	Schuss	49,05	
	Gewebe	74,52	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*aus Dornstädter 2011, S. 66.

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,57	0,51		
0,56	0,53		
0,56	0,42		
0,61	0,62		
0,49	0,51		
0,58	0,53		
0,32	0,60		
0,48	0,57		
0,50	0,50		
0,54	0,47		
0,64	0,39		
0,52	0,74		
0,41	0,58		
0,54	0,45		
0,54	0,44		
0,78	0,45		
0,53	0,57		
0,51	0,53		
0,58	0,50		
0,39	0,42		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	94,00
Schuss	95,00

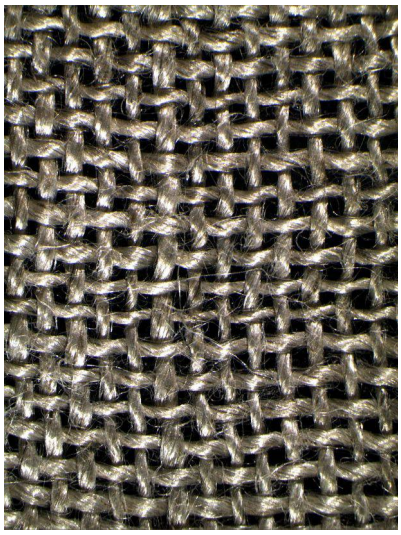


Abbildung B.17: Detail N4.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Kette.

N4-B1

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	0,5	
	Schuss	0,5	
Drehrichtung Garn	Kette	Z	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	61,7	
	Schuss	64,6	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	9,10	
	Schuss	10,00	
Füllung [%]	Kette	45,94	
	Schuss	47,06	
	Gewebe	71,38	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*aus Dornstädter 2011, S. 70.

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,42	0,51		
0,62	0,47		
0,50	0,48		
0,45	0,34		
0,64	0,48		
0,50	0,66		
0,63	0,63		
0,57	0,39		
0,55	0,46		
0,56	0,43		
0,39	0,53		
0,47	0,41		
0,44	0,48		
0,49	0,70		
0,63	0,45		
0,52	0,35		
0,53	0,37		
0,43	0,41		
0,37	0,36		
0,39	0,49		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	91,00
Schuss	100,00

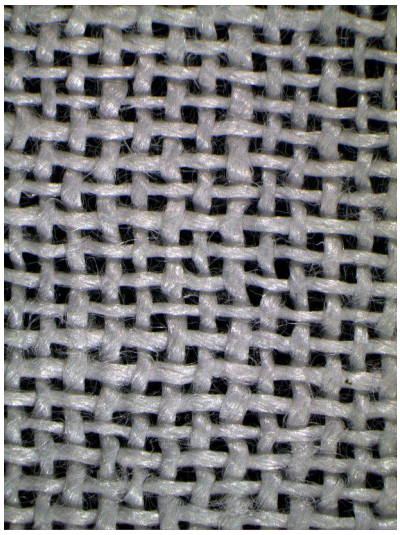


Abbildung B.18: Detail N4-B1.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Schuss.

N5

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	0,7	
	Schuss	0,7	
Drehrichtung Garn	Kette	Z	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	68,1	
	Schuss	68,7	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	6,80	
	Schuss	6,50	
Füllung [%]	Kette	44,34	
	Schuss	43,81	
	Gewebe	68,73	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*aus Dornstädter 2011, S. 67.

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,62	0,72		
0,64	0,63		
0,60	0,55		
0,53	0,78		
0,80	0,80		
0,71	0,50		
0,74	0,58		
0,51	0,68		
0,58	0,35		
0,96	0,71		
0,60	0,58		
0,60	0,64		
0,72	0,64		
0,47	1,27		
0,85	0,61		
0,45	0,62		
0,60	0,99		
0,57	0,82		
0,74	0,60		
0,74	0,41		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	68,00
Schuss	65,00

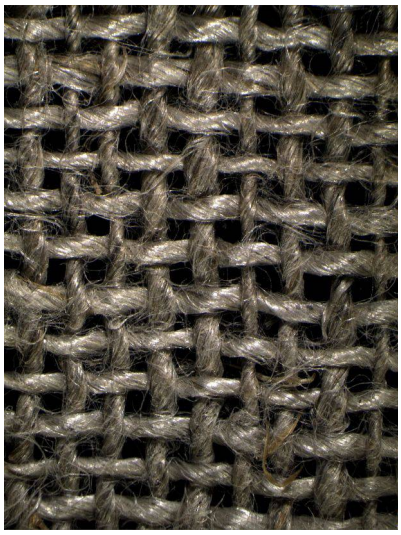


Abbildung B.19: Detail N5.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Kette.

N5-B1

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			
Faserart*	Kette	Flachs	
	Schuss	Flachs	
Garnbreite [mm]	Kette	0,7	
	Schuss	0,6	
Drehrichtung Garn	Kette	Z	
	Schuss	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	65,3	
	Schuss	66,8	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	Kette	6,50	
	Schuss	6,30	
Füllung [%]	Kette	46,47	
	Schuss	40,90	
	Gewebe	68,36	
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*aus Dornstädter 2011, S. 71.

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse			
Garnbreite [mm]		**Fasersteigungswinkel Garn [°]**	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,64	0,91		
0,77	0,62		
0,97	0,85		
0,69	0,72		
0,72	0,67		
0,59	0,53		
0,85	0,60		
0,95	0,51		
0,55	0,70		
0,68	0,48		
0,68	0,70		
0,62	0,51		
0,62	0,63		
0,63	0,71		
0,64	0,52		
0,71	0,65		
0,72	0,71		
0,74	0,62		
0,70	0,75		
0,82	0,59		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette	65,00
Schuss	63,00

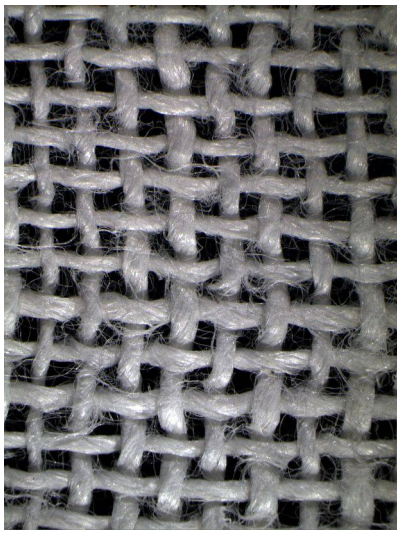


Abbildung B.20: Detail N5-B1.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Schuss.

N6

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Bezugsadresse:
Faserart*	R1	Flachs	Deffner und Johann
	R2	Flachs	Mühläcker Str. 13
Garnbreite [mm]	R1	0,5	97520 Röthlein
	R2	0,7	Artikel Nr. 2820010
Drehrichtung Garn	R1	Z	„Belgisches Leinen roh“
	R2	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	R1	64,9	
	R2	69,4	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	R1	16	
	R2	14,2	
Füllung [%]	R1	75,99	
	R2	94,13	
	Gewebe	98,59	
Flächengewicht [g/m²]*	Gewebe	305	* Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
R1	**R2**	**R1**	**R2**
0,39	0,50	66,3	73,59
0,36	0,88	64,14	51,47
0,59	0,75	68,92	75,3
0,47	0,51	71,82	65,73
0,52	0,57	71,3	67,67
0,47	0,76	79,04	72,52
0,50	0,48	17,5	73,29
0,60	0,62	68,66	77,0
0,35	0,85	74,93	70,44
0,41	0,65	65,93	66,5
0,52	0,71		
0,46	0,92		
0,41	0,63		
0,49	0,84		
0,48	0,52		
0,47	0,57		
0,51	0,82		
0,58	0,65		
0,40	0,59		
0,53	0,44		

Fadendichte pro 5 cm	
R1:	80,00
R2:	71,00

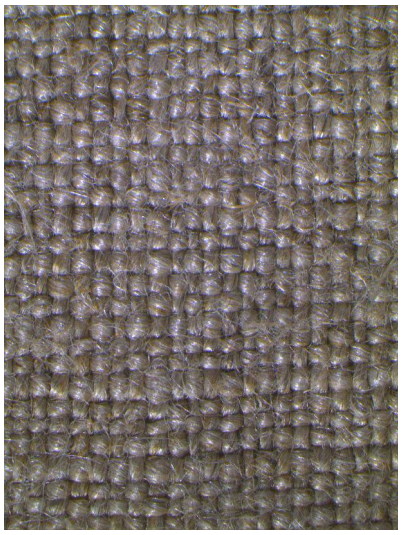


Abbildung B.21: Detail N6.
Bildbreite ca. 13 cm. Horizontal: R2

N8

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Bezugsadresse:
Faserart*	R1	Flachs	Kremer Pigmente
	R2	Flachs	Farbmühle
Garnbreite [mm]	R1	0,5	88317 Aichstetten
	R2	0,4	Artikel Nr: 873060
Drehrichtung Garn	R1	Z	„Doublierleinwand L518“
	R2	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	R1	71,7	
	R2	71,1	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	R1	17,00	
	R2	18,10	
Füllung [%]	R1	79,23	
	R2	68,47	
	Gewebe	93,45	
Flächengewicht [g/m²]*	Gewebe	135	* Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
R1	**R2**	**R1**	**R2**
0,41	0,32	76,12	69,17
0,38	0,41	65,44	75,96
0,38	0,39	68,81	70,07
0,55	0,32	73,47	68,79
0,59	0,31	69,19	71,38
0,39	0,49	75,00	74,29
0,57	0,44	73,64	70,59
0,39	0,26	70,24	71,83
0,37	0,40	74,68	72,90
0,45	0,38	70,13	66,50
0,58	0,38		
0,52	0,26		
0,43	0,48		
0,40	0,32		
0,60	0,33		
0,46	0,35		
0,40	0,29		
0,36	0,46		
0,63	0,56		
0,44	0,42		

Fadendichte pro 5 cm	
R1:	85,00
R2:	90,50



Abbildung B.22: Detail N8.
Bildbreite ca. 13 cm. Horizontal: R2

N7

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Bezugsadresse:
Faserart*	R1	Flachs	Kremer Pigmente
	R2	Flachs	Farbmühle
Garnbreite [mm]	R1	0,3	88317 Aichstetten
	R2	0,4	Artikel Nr: 873050
Drehrichtung Garn	R1	Z	„Doublierleinwand L517“
	R2	Z	
Fasersteigungswinkel Garn [°]	R1	74,5	
	R2	60,7	
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	
Fadendichte pro cm	R1	28,75	
	R2	26,25	
Füllung [%]	R1	75,33	
	R2	92,70	
	Gewebe	98,20	
Flächengewicht [g/m²]*	Gewebe	180	* Herstellerangabe

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
R1	**R2**	**R1**	**R2**
0,32	0,51	70,02	70,61
0,29	0,23	73,04	65,06
0,26	0,51	69,93	66,04
0,30	0,23	77,68	53,79
0,25	0,27	70,79	63,43
0,27	0,42	72,65	55,15
0,30	0,17	70,41	60,36
0,29	0,45	83,66	61,99
0,19	0,41	77,28	50,19
0,31	0,31	79,77	59,98
0,30	0,32		
0,20	0,37		
0,23	0,28		
0,26	0,44		
0,26	0,41		
0,23	0,32		
0,23	0,28		
0,21	0,34		
0,29	0,34		
0,25	0,43		

Fadendichte pro 5 cm	
R1:	86,25
R2:	78,75



Abbildung B.23: Detail N7.
Bildbreite ca. 13 cm. Horizontal: R2

H-16/17-M

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	Kette	Flachs	Objekt	Leinwandgemälde
am Gemälde horizontal	Schuss	Flachs	Künstler	Umkreis Lucas Cranach d. J.
Garnbreite [mm]*	Kette	0,8	Titel	Porträt Philipp Melanchthon
	Schuss	0,9		
Drehrichtung Garn*	Kette	Z	Datierung	Ende 16./Anfang 17. Jh.
	Schuss	Z	Maße (HxB)	228 x 119 cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	64,1	Eigentümer	Ev. Predigerseminar Wittenberg
	Schuss	62,7	Standort	Melanchthonhaus Wittenberg
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	keine
Fadendichte pro cm*	Kette	9,00	Maltechnik	Leinwand: zwei Gewebebahnen, der Länge nach zusammengenäht. Vorleimung vorhanden, Protein nachgewiesen. Grundierung: ölhaltiges Bindemittel, Gips, Kreide. Malschicht: trocknendes Öl Harzhaltiger Überzug
	Schuss	9,60		
Füllung [%]	Kette	76,05		
	Schuss	82,80		
	Gewebe	95,88		
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Bestimmung durch Theresa Bräunig	

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
1,09	0,84	67,08	60,47
1,14	1,03	66,42	67,46
1,02	1,00	66,32	71,93
0,89	0,99	55,76	61,97
0,93	1,07	52,06	77,08
1,24	1,57	65,75	57,06
1,14	1,14	66,50	60,98
1,14	0,89	59,74	67,58
1,10	0,75	70,85	51,12
0,95	0,71	70,85	51,34
1,07	1,18		
0,85	1,34		
0,89	0,77		
0,73	0,89		
0,61	0,79		
0,38	0,46		
0,38	0,45		
0,43	0,49		
0,46	0,42		
0,46	0,47		

Fadendichte pro 10 cm	
Kette:	90,00
Schuss:	96,00



Abbildung B.24: Porträt Philipp Melanchthon.
Fotografin: Kerstin Rißе.



Abbildung B.25: Detail H-16/17-M.
Bildbreite entspricht ca. 10 mm

H-17/18-D

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	Kette	Flachs	Objekt	Gemälde
am Gemälde vertikal	Schuss	Flachs	Künstler	ubk.
Garnbreite [mm]*	Kette	0,5	Titel	Kaiser Friedrich der Andere verleiht dem Deutschen Orden Wappinsignien
	Schuss	0,5		
Drehrichtung Garn*	Kette	Z	Datierung	Spätes 17. Jh. oder 18. Jh.
	Schuss	Z	Maße (HxB)	107 x 141 cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	65,4	Eigentümer	Klassik Stiftung Weimar
	Schuss	72,0		
Bindungsart*	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	KGe/01160
Fadendichte pro cm*	Kette	7,30	Maltechnik	Netzartige Leinwand Vorleimung (Protein und Stärke) Dicke Grundierung vermutl. Ölgebunden. Malschicht Ohne Überzug
	Schuss	5,60		
Füllung [%]*	Kette	38,69		
	Schuss	29,68		
	Gewebe	56,89		
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Daten aus Schmidt 2011, S. 202, 265, 266, 271.	



Abbildung B.26: Kaiser Friedrich der Andere verleiht dem Deutschen Orden Wappeninsignien.
Aus Schmidt 2011, S. 163.



Abbildung B.27: Detail H-17/18-D.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm

H-18-E1

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	Kette	Flachs	Objekt	Wandbespannung
am Objekt horizontal	Schuss	Flachs	Künstler	ubk.
Garnbreite [mm]*	Kette	0,4	Titel	kein Titel
	Schuss	0,4		
Drehrichtung Garn*	Kette	Z	Datierung	2. Hälfte 18. Jh.
	Schuss	Z	Maße (HxB)	270 x 70 cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	70,4	Eigentümer	Apel'sche Kultur-Stiftung
	Schuss	65,1	Standort	Herrenhaus Ermlitz, Weißer Saal
Bindungsart*	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	3OOB3
Fadendichte pro cm*	Kette	15,30	Maltechnik	Gebleichtes Flachsgewebe
	Schuss	15,70		Dünne, wässrig gebundene Grundierung
Füllung [%]*	Kette	61,20		Wässrig gebundene Malschicht
	Schuss	69,08		Kein Überzug
	Gewebe	88,00		
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	* Daten aus Konietzny 2012, S. 121.	

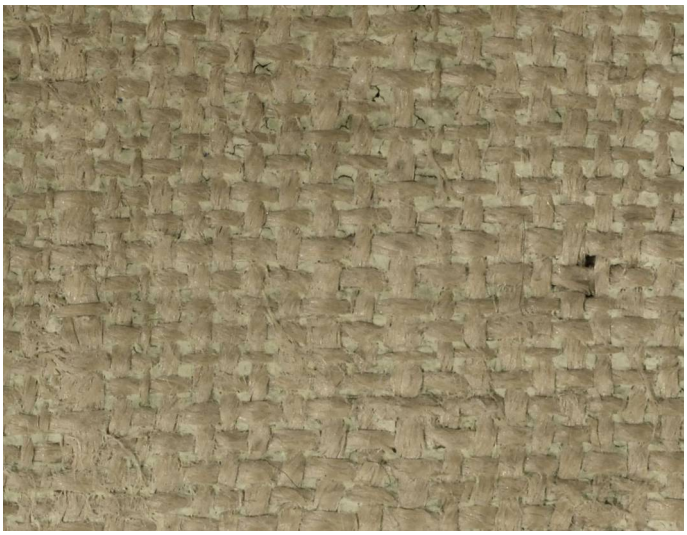


Abbildung B.28: Detail H-18-E1.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm. Horizontal: Schuss. Aus Konietzny 2012, S. 82.



Abbildung B.29: Wandbespannung Herrenhaus Ermlitz Weißer Saal. 3OOB3.
Aus Konietzny 2012, S. 78.

H-18-E2

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart	R1	Flachs	Objekt	Wandbespannung
	R2	Flachs	Künstler	ubk.
Garnbreite [mm]			Titel	kein Titel
Drehrichtung Garn			Datierung	2. Hälfte 18. Jh.
			Maße (HxB)	
Fasersteigungswinkel Garn [°]			Eigentümer	Apel'sche Kultur-Stiftung
			Standort	Herrenhaus Ermlitz, Weißer Saal
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	3WOB1
Fadendichte pro cm			Maltechnik	Gebleichtes Flachsgewebe Dünne, wässrig gebundene Grundierung Wässrig gebundene Malschicht Kein Überzug
Füllung [%]				
Flächengewicht [g/m²]				



Abbildung B.30: Wandbespannung Herrenhaus Ermlitz, Weißer Saal. 3WOB1.
Fotografin: Stefanie Hilden.

H-19-T1

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	Kette	Flachs	Objekt	Leinwandgemälde
am Gemälde horizontal	Schuss	Flachs	Künstler	Adolph Thomas
Garnbreite [mm]	Kette	0,5	Titel	Amor erblickt die schlafende Psyche (Nr. 1 des Zyklus)
	Schuss	0,4		
Drehrichtung Garn	Kette	Z	Datierung	1873
	Schuss	Z	Maße (HxB)	120 x 165 cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	66,6	Eigentümer	Stadtmuseum Zittau
	Schuss	69,7	Standort	Stadtmuseum Zittau
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	14357/60
Fadendichte pro cm	Kette	16,00	Maltechnik	Leinwand Vorleimung: Stärke Grundierung dünne ölhaltige Malschicht Überzug
	Schuss	16,90		
Füllung [%]	Kette	81,62		
	Schuss	60,57		
	Gewebe	92,75		
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Bestimmung durch Theresa Bräunig	

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,51	0,32	72,73	75,93
0,51	0,33	60,64	63,25
0,52	0,33	74,93	65,68
0,50	0,43	76,22	71,57
0,58	0,51	58,26	71,79
0,65	0,25	58,43	70,72
0,44	0,31	63,86	74,70
0,37	0,31	66,12	72,00
0,62	0,33	68,60	63,42
0,66	0,36	66,36	68,20
0,39	0,37		
0,50	0,38		
0,56	0,34		
0,57	0,39		
0,53	0,34		
0,40	0,42		
0,56	0,32		
0,42	0,38		
0,38	0,43		
0,53	0,32		

Fadendichte pro 5 cm	
Kette:	80,00
Schuss:	84,50



Abbildung B.31: Detail H-19-T1.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm. Horizontal: Kette.

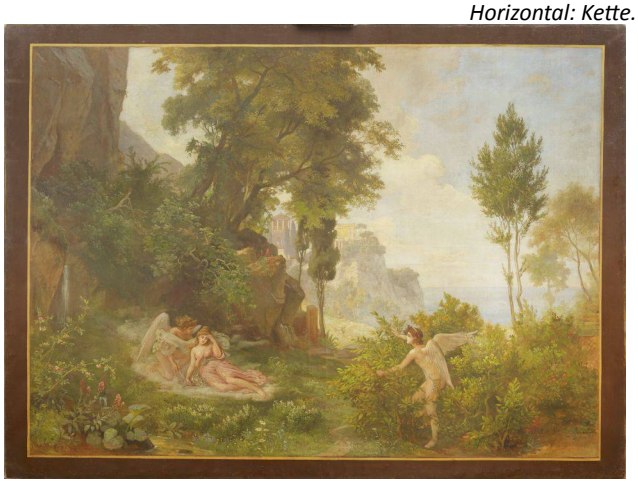


Abbildung B.32: Adolph Thomas: Amor erblickt die schlafende Psyche.
Fotografin: Kerstin Rißе.

H-19-T2

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	Kette	Flachs	Objekt	Leinwandgemälde
am Gemälde vertikal	Schuss	Flachs	Künstler	Adolph Thomas
Garnbreite [mm]	Kette	0,6	Titel	Amor entschwebt der verzweifelten
	Schuss	0,4		Psyche (Nr. 3 des Zyklus)
Drehrichtung Garn	Kette	Z	Datierung	1873
	Schuss	Z	Maße (HxB)	165x120cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	62,9	Eigentümer	Stadtmuseum Zittau
	Schuss	64,2	Standort	Stadtmuseum Zittau
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	14359/60
Fadendichte pro cm	Kette	16,20	Maltechnik	Leinwand
	Schuss	14,60		Keine Grundierung
Füllung [%]	Kette	89,31		dünne rot-braune Untermalung
	Schuss	57,82		ölhaltige Malschicht
	Gewebe	95,49		Überzug
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Bestimmung durch Theresa Bräunig	

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,46	0,31	58,55	64,45
0,62	0,33	68,38	54,71
0,61	0,29	60,80	67,59
0,51	0,30	58,98	60,59
0,59	0,38	67,28	71,31
0,59	0,31	62,71	72,48
0,43	0,31	62,47	61,99
0,54	0,32	60,48	64,66
0,56	0,46	61,51	61,81
0,53	0,54	67,75	62,40
0,58	0,51		
0,62	0,33		
0,49	0,39		
0,49	0,37		
0,56	0,36		
0,62	0,47		
0,48	0,37		
0,69	0,51		
0,46	0,67		
0,62	0,39		

Fadendichte pro 5 cm	
Kette:	81,00
Schuss:	73,00

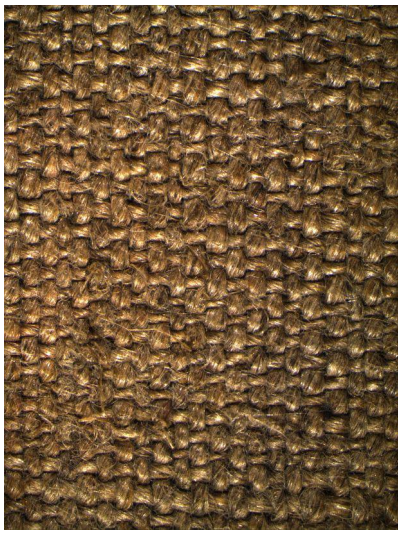


Abbildung B.33: Detail H-19-T2.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Schuss.

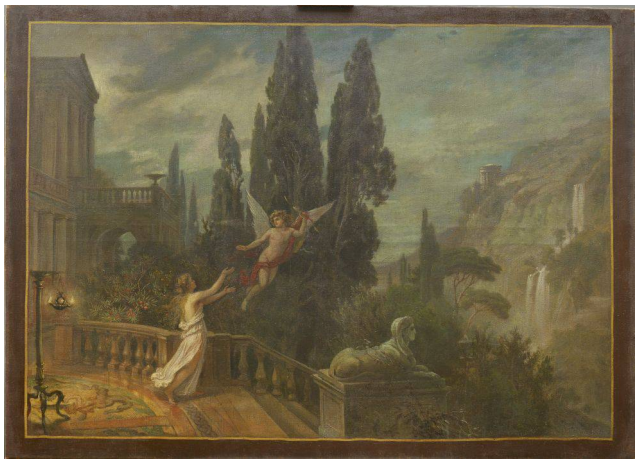


Abbildung B.34: Adolph Thomas: Amor entschwebt der verzweifelten Psyche.
Fotografin: Kerstin Rißе.

H-20-H1

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	R1	Flachs	Objekt	Leinwandgemälde
	R2	Flachs	Künstler	Josef Hegenbarth
Garnbreite [mm]*	R1	0,5	Titel	Löwe und fressender Leopard
	R2	0,6		
Drehrichtung Garn*	R1	Z	Datierung	vermutl. vor 1945
	R2	Z	Maße (HxB)	56,3 x 44,7 cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	R1	68,9	Eigentümer	Lindenau-Museum Altenburg
	R2	71,4		
Bindungsart*	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	2386
Fadendichte pro cm*	R1	9,88	Maltechnik	Leinwand Vorleimung vermutet Grundierung vermutl. gewerblich Malschicht: Mischtechnik Kein Überzug
	R2	10,56		
Füllung [%]*	R1	44,46		
	R2	58,08		
	Gewebe	76,72		
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	* Daten aus Hellinger 2012, S. 142.	

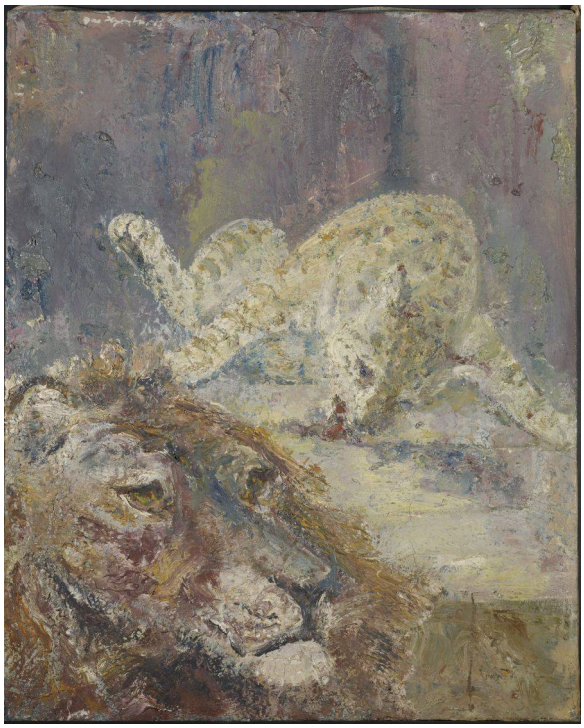


Abbildung B.35: Josef Hegenbarth: Löwe und fressender Leopard.
Aus Hellinger 2012, S. 15.

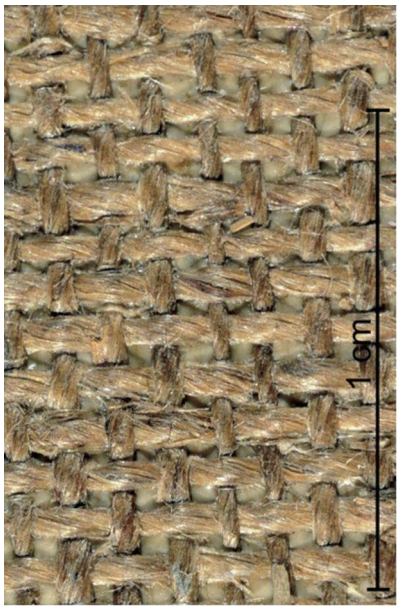


Abbildung B.36: Detail H-20-H1
R1: vertikal. Aus Hellinger 2012, S. 33.

H-20-H2

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	Kette	Flachs	Objekt	Leinwandgemälde
am Gemälde vertikal	Schuss	Flachs	Künstler	Josef Hegenbarth
Garnbreite [mm]*	Kette	0,9	Titel	Auf der Aussichtsplattform
	Schuss	0,6		
Drehrichtung Garn*	Kette	Z	Datierung	vermutl. um 1945
	Schuss	Z	Maße (HxB)	53 x 75,3 cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	69,6	Eigentümer	Lindenau-Museum Altenburg
	Schuss	66,4	Standort	
Bindungsart*	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	2388
Fadendichte pro cm*	Kette	10,40	Maltechnik	Leinwand Vorleimung vermutet Grundierung Malschicht: Mischtechnik Kein Überzug
	Schuss	8,90		
Füllung [%]*	Kette	93,60		
	Schuss	53,40		
	Gewebe	97,02		
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	* Daten aus Hellinger 2012, S. 140.	



Abbildung B.37: Josef Hegenbarth: Auf der Aussichtsplattform. Aus Hellinger 2012, S. 13.

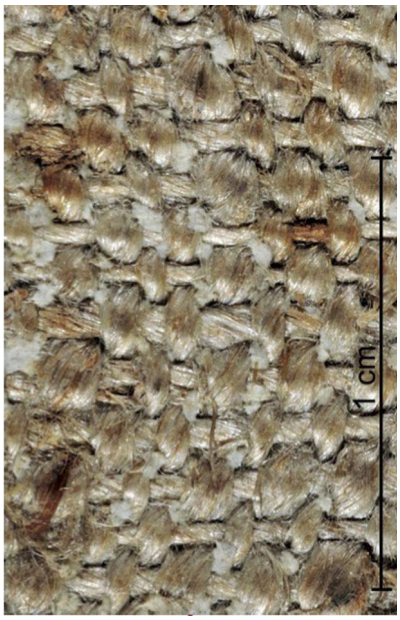


Abbildung B.38: Detail H-20-H2. Horizontal: Schuss. Aus Hellinger 2012, S. 33.

H-19-M

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	Kette	Flachs	Objekt	Leinwandgemälde
am Gemälde horizontal	Schuss	Flachs	Künstler	ubk.
Garnbreite [mm]*	Kette	0,6	Titel	König Maximilian I, Joseph
	Schuss	0,7		
Drehrichtung Garn*	Kette	Z	Datierung	19. Jh. nach 1806
	Schuss	Z	Maße (HxB)	114 x 83,5 cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]*	Kette	61,0	Eigentümer	Mainfränkisches Museum
	Schuss	62,5	Standort	Würzburg
Bindungsart*	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	Temp.193
Fadendichte pro cm*	Kette	10,20	Maltechnik	Leinwand Vorleimung (Protein, evtl. Stärke) Grundierung, Öl Dünne Malschicht, Öl Überzug
	Schuss	8,70		
Füllung [%]*	Kette	62,22		
	Schuss	63,51		
	Gewebe	86,21		
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	* Daten aus Langner 2012, S. 182—183.	



Abbildung B.39: König Maximilian I, Joseph. Aus Langner 2012, S. 116.



Abbildung B.40: Detail H-19-M. Bildbreite entspricht ca. 13 mm. Horizontal: Kette. Aus Langner 2012, S. 128.

H-20-U1

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	R1	Flachs	Objekt	Leinwandgemälde
	R2	Flachs	Künstler	ubk.
Garnbreite [mm]	R1	0,7	Titel	Torso eines Frauenkörpers
	R2	0,6		
Drehrichtung Garn	R1	Z	Datierung	20. Jh.
	R2	Z	Maße (HxB)	89 x 75 cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]	R1	66,5	Eigentümer	Ivo Mohrmann
	R2	68,9	Standort	HfBK Dresden
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	keine
Fadendichte pro cm	R1	15,00	Maltechnik	Leinwand, nicht aufgespannt ohne Grundierung Malschicht kein Überzug
	R2	13,80		
Füllung [%]	R1	103,09		
	R2	78,96		
	Gewebe	100,65		
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Bestimmung durch Theresa Bräunig	

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,61	0,66	61,83	65,34
0,76	0,53	70,94	63,72
0,54	0,46	61,69	75,56
0,60	0,62	66,37	64,75
0,55	0,63	68,84	74,20
0,86	0,52	59,63	66,29
0,72	0,57	72,72	62,82
0,59	0,66	60,10	66,41
0,73	0,52	75,15	72,52
1,08	0,58	68,09	77,72
0,92	0,44		
0,70	0,62		
0,49	0,46		
0,53	0,53		
0,33	0,51		
0,50	0,63		
0,93	0,60		
0,91	0,79		
	0,62		
	0,50		

Fadendichte pro 5 cm	
Kette:	75,00
Schuss:	69,00



Abbildung B.41: Detail H-20-U1.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: R2.



Abbildung B.42: Torso eines Frauenkörpers.
Fotografin: Monika Kammer.

H-20-U2

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	Kette	Flachs	Objekt	Leinwandgemälde
am Gemälde horizontal	Schuss	Flachs	Künstler	Albert Ludwig Jahn
Garnbreite [mm]	Kette	0,7	Titel	Stadt am Fluss (Heiligenstadt)
	Schuss	0,6		
Drehrichtung Garn	Kette	Z	Datierung	20. Jh.
	Schuss	Z	Maße (HxB)	64 x 71 cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	-	Eigentümer	Ivo Mohrmann
	Schuss	-	Standort	HfBK Dresden
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	180
Fadendichte pro cm	Kette	13,20	Maltechnik	Leinwand ursprünglich aufgespannt
	Schuss	12,00		
Füllung [%]	Kette	94,64		
	Schuss	73,86		
	Gewebe	98,60		
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Bestimmung durch Theresa Bräunig	

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,54	0,93		
0,89	0,85		
0,54	0,50		
0,73	0,54		
0,73	0,54		
0,69	0,58		
0,73	0,54		
0,73	0,66		
0,62	0,77		
0,66	0,69		
0,93	0,50		
0,77	0,58		
0,81	0,46		
0,89	0,69		
0,54	0,54		
0,73	0,62		
0,77	0,62		
0,62	0,54		
0,69	0,50		
0,73	0,66		

Fadendichte pro 5 cm	
Kette:	66,00
Schuss:	60,00

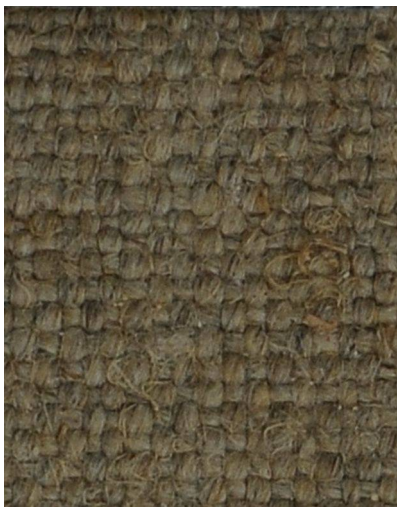


Abbildung B.43: Detail H-20-U2.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Schuss.

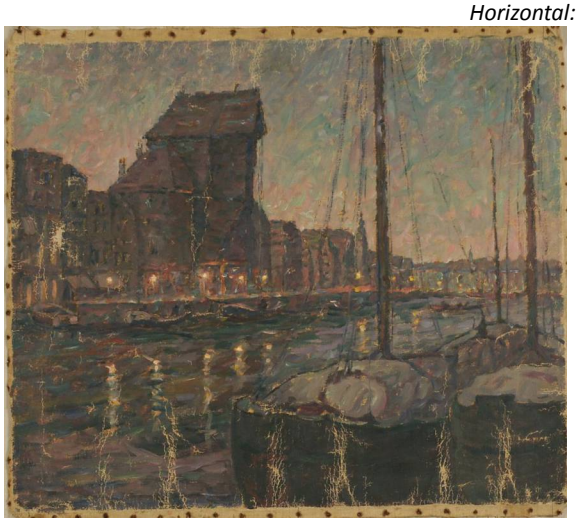


Abbildung B.44: Albert Ludwig Jahn: Stadt am Fluss (Heiligenstadt).
Fotoarafin: Monika Kammer.

H-20-U3

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	R1	Flachs	Objekt	Leinwandgemälde
	R2	Flachs	Künstler	ubk.
Garnbreite [mm]	R1	0,6	Titel	Erschrockenes Mädchen
	R2	0,5		(Gret Palucca?)
Drehrichtung Garn	R1	Z	Datierung	20. Jh.
	R2	Z	Maße (HxB)	123 x 91 cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]	R1	65,3	Eigentümer	Ivo Mohrmann
	R2	74,7	Standort	HfBK Dresden
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	keine
Fadendichte pro cm	R1	13,40	Maltechnik	Leinwand nicht aufgespannt
	R2	14,40		
Füllung [%]	R1	82,60		
	R2	79,12		
	Gewebe	96,37		
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Bestimmung durch Theresa Bräunig	

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,63	0,45	64,76	69,10
0,52	0,44	65,66	77,45
0,56	0,47	57,07	76,13
0,47	0,47	68,90	74,62
0,66	0,55	69,75	74,03
0,44	0,71	58,17	71,95
0,45	0,65	59,31	74,62
0,61	0,65	65,32	78,22
0,60	0,55	74,43	79,99
0,86	0,59	69,27	71,14
0,44	0,53		
0,60	0,74		
0,86	0,54		
0,67	0,36		
0,56	0,74		
0,52	0,48		
0,70	0,54		
0,92	0,54		
0,69	0,47		
0,58	0,52		

Fadendichte pro 5 cm	
Kette:	72,00
Schuss:	67,00



Abbildung B.45: Detail H-20-U3.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm. Horizontal: R2.



Abbildung B.46: Erschrockenes Mädchen.
Fotografin: Monika Kammer.

H-20-U4

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	Kette	Flachs	Objekt	Leinwandgemälde
am Gemälde horizontal	Schuss	Flachs	Künstler	ubk.
Garnbreite [mm]	Kette	0,6	Titel	Frau mit Kopftuch im Halbprofil
	Schuss	0,6		
Drehrichtung Garn	Kette	Z	Datierung	20. Jh.
	Schuss	Z	Maße (HxB)	113 x 91 cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	68,4	Eigentümer	Ivo Mohrmann
	Schuss	66,2	Standort	HfBK Dresden
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	186
Fadendichte pro cm	Kette	10,80	Maltechnik	Leinwand nicht aufgespannt
	Schuss	10,60		
Füllung [%]	Kette	66,67		
	Schuss	65,18		
	Gewebe	88,39		
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Bestimmung durch Theresa Bräunig	

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,63	0,75	66,39	64,20
0,56	0,63	75,06	65,98
0,61	0,48	68,36	61,48
0,54	0,48	68,31	68,54
0,55	0,67	70,92	63,09
0,72	0,57	64,99	70,05
0,56	0,66	63,00	70,35
0,55	0,95	66,76	63,63
0,58	0,53	68,35	70,70
0,62	0,54	71,80	63,52
0,66	0,52		
0,61	0,79		
0,61	0,80		
0,71	0,44		
0,75	0,52		
0,80	0,53		
0,57	0,61		
0,64	0,51		
0,46	0,60		
	0,70		

Fadendichte pro 5 cm	
Kette:	53,00
Schuss:	54,00



Abbildung B.47: Detail H-20-U4.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm. Horizontal: Kette.



Abbildung B.48: Frau mit Kopftuch im Halbprofil.
Fotografin: Monika Kammer.

H-20-U5

Zusammenfassung Gewebestrukturanalyse			Angaben zum Gemälde	
Faserart*	Kette	Flachs	Objekt	Leinwandgemälde
am Gemälde horizontal	Schuss	Flachs	Künstler	ubk.
Garnbreite [mm]	Kette	0,7	Titel	Frauenpoträt (in Tracht)
	Schuss	0,7		
Drehrichtung Garn	Kette	Z	Datierung	20. Jh.
	Schuss	Z	Maße (HxB)	107 x 80 cm
Fasersteigungswinkel Garn [°]	Kette	69,1	Eigentümer	Ivo Mohrmann
	Schuss	65,2	Standort	HfBK Dresden
Bindungsart	Gewebe	Leinwandbindung	Inventar Nr	189
Fadendichte pro cm	Kette	10,60	Maltechnik	Leinwand nicht aufgespannt
	Schuss	10,00		
Füllung [%]	Kette	74,04		
	Schuss	65,73		
	Gewebe	91,10		
Flächengewicht [g/m²]	Gewebe	nicht bestimmt	*Bestimmung durch Theresa Bräunig	

Einzelwerte Gewebestrukturanalyse

Garnbreite [mm]		Fasersteigungswinkel Garn [°]	
Kette	**Schuss**	**Kette**	**Schuss**
0,75	0,74	68,85	56,90
0,52	0,74	70,88	65,14
1,12	0,73	63,35	65,53
0,53	0,90	76,50	68,34
0,63	0,65	72,65	69,21
0,50	0,55	70,57	61,94
0,98	0,64	67,43	65,36
0,70	0,60	62,61	69,44
0,88	0,61	63,29	64,18
0,61	0,62	74,85	65,72
0,96	0,61		
0,62	1,06		
0,74	0,65		
0,66	0,71		
0,57	0,69		
0,71	0,38		
0,63	0,67		
0,54	0,62		
0,62	0,40		
0,70	0,56		

Fadendichte pro 5 cm	
Kette:	53,00
Schuss:	50,00



Abbildung B.49: Detail H-20-U5.
Bildbreite entspricht ca. 13 mm.
Horizontal: Kette.



Abbildung B.50: Frauenporträt (in Tracht).
Fotografin: Monika Kammer.

B.3 Ergebnisse pH-Wert Messung

Tabelle B.1: Ergebnisse der Messung der pH-Werte mit der Oberflächenelektrode.

Probenbezeichnung	Messwerte			Mittelwert	Standardabweichung
N1	6,08	6,37	6,30	6,25	0,15
N1-A-K4-u	6,26	6,47	6,37	6,37	0,11
N1-A-K4-g	6,23	6,45	6,35	6,34	0,11
N1-A-K10-u	6,10	6,20	6,14	6,15	0,05
N1-A-K10-g	6,15	6,12	6,13	6,13	0,02
N1-A-TL	5,97	5,90	6,21	6,03	0,16
N1-A-X84	5,80	6,12	5,99	5,97	0,16
N1-A-X168	5,36	5,80	5,53	5,56	0,22
N1-A-TL-K4-u	5,94	6,01	5,90	5,95	0,06
N1-A-X84-K4-u	5,93	6,02	-	5,98	0,06
N1-A-X168-K4-u	5,46	5,64	5,38	5,49	0,13
N1-A-K105-u	6,12	6,25	6,26	6,21	0,08
N2	6,68	6,41	6,81	6,63	0,20
N2-B1	8,54	8,40	8,55	8,50	0,08
N3	7,70	7,30	7,67	7,56	0,22
N3-B1	8,29	8,95	8,23	8,49	0,40
N3-B2	9,05	9,10	8,52	8,89	0,32
N4	6,81	6,76	6,85	6,81	0,05
N4-B1	7,30	7,20	7,66	7,39	0,24
N5	7,14	6,70	6,76	6,87	0,24
N5-B1	8,60	9,02	8,68	8,77	0,22

B.4 Kapillarviskosimetrie

B.4.1 Verwendete Geräte

Waage:
Mettler AE 166
Ablesbarkeit: 0,1 mg, Reproduzierbarkeit (Standardabweichung): 0,1 mg, Linearität: ± 0,2 mg

Zentrifuge:
Eppendorf Centrifuge 5804

Viskosimeter:
1. Ubbelohde-Viskosimeter mit hängendem Kugelniveau
Typ- und Kapillare-Nr: 501 13/Ic
Apparate Nr. 1053840 SI Analytics GmbH, Mainz
2. Mikro-Ubbelohde-Viskosimeter mit hängendem Kugelniveau
Typ- und Kapillare-Nr.: 537 13/Ic
Apparate-Nr.: 1054230 SI Analytics GmbH, Mainz

B.4.2 Protokoll zur Erfassung des Feuchtezuschlags der Garnproben

Es erfolge die Einwaage der Garnproben mit o. g. Waage auf 0,01 mg genau. Die Garnproben befanden sich im Gleichgewicht mit 18 °C / 60 %rF. Die Proben wurden im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet. In regelmäßigen Abständen wurden sie gewogen. Sobald die Massekonstanz erreicht war, wurde die Bestimmung abgeschlossen. Die Massekonstanz galt als erreicht, wenn zwei im Abstand von 60 Minuten aufeinander folgenden Wägungen um höchstens 0,05 % bezogen auf m_f, voneinander abwichen. Diese Richtlinie ist der Vorschrift zur Bestimmung des Trockengehaltes von Zellstoffproben entnommen.[797] Eine entsprechende Vorschrift für Textilien liegt nicht vor.

797 Zellcheming-Merkblatt IV/42/67.

Berechnet wurde der

Feuchtezuschlag $$u = \frac{m_f - m_{tr}}{m_{tr}} \quad \text{(B.1)}$$

m_f = Masse der Probe im feuchten Zustand
m_{tr} = Masse der Probe im trockenen Zustand

Die Ergebnisse für m_f, m_{tr} und u sind in Tabelle B.2 wieder gegeben.

Tabelle B.2: Berechnung des Feuchtezuschlags u [%] für 18 °C/60 %rF nach Trocknung bei 105 °C.

Probenname	m_f **[g] 18 °C/60 %rF**	m_{tr} **[g]**	u **[%]**
N2	0,7610	0,7076	7,55
N2-B1	0,7892	0,7408	6,53
N3	0,6175	0,5759	7,22
N3-B1	0,7048	0,6608	6,66
N3-B2	0,6124	0,5739	6,71
N4	0,5258	0,4898	7,35
N4-B1	0,6420	0,6000	7,00
N5	0,7084	0,6550	8,15
N5-B1	0,7482	0,6996	6,95
N1	0,6172	0,5755	7,25
N1-A-K4-u	1,1506	1,0744	7,09
N1-A-K4-g	0,6686	0,6242	7,11
N1-A-K10-u	1,0147	0,9477	7,07
N1-A-K10-g	0,5986	0,5611	6,68
N1-A-TL	0,6557	0,6114	7,25
N1-A-X84	0,7224	0,6744	7,12
N1-A-X168	0,6054	0,5642	7,30
N1-A-TL-K4-u	1,1505	1,0756	6,96
N1-A-X84-K4-u	0,7165	0,6708	6,81
N1-A-X168-K4-u	1,7487	1,6465	6,21

Tabelle B.3: Schätzung des Feuchtezuschlags für die Berechnung der Einwaage für die Viskositätsbestimmung.

Probenname	u [%] Sorptionsisotherme 25°C/60%rF	u [%] 18°C/60%rF aus Tabelle B.2	Differenz beider Messungen	U 25/60 zzgl. der Differenz N1-A-X168-K4-u
N1	6,115	7,25	1,135	
N1-A-X168-K4-u	5,785	6,21	0,425	
H-19-T1	6,375			6,80
H-19-T2	6,475			6,90
H-20-H1	6,325			6,75
H-20-H2	5,965			6,39
H-19-M	6,120			6,545
H-18-E1	5,655			6,08
H-17/18-M	5,645			6,07

B.4.3 Messprotokolle Viskosität

Messung der Viskosität 22.02.11 09.09.12

Ubbelohde 501 13 / Ic Ubbelohde 537 13 / Ic

Probe	**EWNN**	**N1**	**N1-A-TL**	**N1-A-TL-K4-u**	**N1-A-K10-u**	**N1-A-K10-g**	**N1-A-X84**	**N1-A-X168**	**N1-A-X84-K4-u**	**N1-A-X168-K4-u**	**EWNN a**	**EWNN b**	**H-19-T1 (S) a**	**H-19-T1 (S) b**
Masse Fasern feucht [g]		0,0070	0,0070	0,0070	0,0070	0,0070	0,0070	0,0070	0,0070	0,0070			0,0028	0,0028
Feuchtezuschlag [%] 18°C/60%rF		7,25	7,25	6,96	7,07	6,68	7,12	7,30	6,81	6,21			6,80	6,80
Masse Fasern trocken [g]		0,006493	0,006493	0,006513	0,006505	0,006532	0,006502	0,006489	0,006523	0,006565			0,002610	0,002610
Menge Lösungsmittel [ml]		25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0	25,0			10,0	10,0
Konzentration c [g/ml]		0,000260	0,000260	0,000261	0,000260	0,000261	0,000260	0,000260	0,000261	0,000263			0,000261	0,000261
Durchflusszeit t [s]	102,0	164,7	163,4	150,7	148,5	146,3	145,7	140,8	136,8	131,9	95,5	95,3	103,4	104,0
	102,1	164,6	163,2	151,1	148,4	146,3	146,0	140,7	136,8	131,7	95,3	95,4	103,5	104,0
	102,1	164,3	163,1	150,6	148,3	146,4	145,9	140,7	136,8	131,7	95,5	95,4	103,6	103,9
	102,0	164,5	163,2	150,5	147,8	146,4	145,9	140,8	136,7	131,6	95,3	95,4	103,5	103,9
	102,1	164,5	163,2	150,6	148,0	146,2	146,0	140,6	136,5	131,7	95,4	95,2	103,7	104,0
t [s] ∅	102,0600	164,5200	163,2200	150,7000	148,2000	146,3200	145,9000	140,7200	136,7200	131,7200	95,4	95,3	103,6	104,0
Korrekturwert Bezug	100	165	165	150	150	145	145	140	135	130	95	95		
Korrekturwert [s]	0,17	0,06	0,06	0,07	0,07	0,075	0,075	0,08	0,09	0,10	0,01	0,01	0,00	0,00
korrigierte Durchflusszeit t [s]	101,8900	164,4600	163,1600	150,6300	148,1300	146,2450	145,8250	140,6400	136,6300	131,6200	95,4	95,3	103,6	104,0
relative Viskosität	-	1,6141	1,6013	1,4784	1,4538	1,4353	1,4312	1,3803	1,3410	1,2918			1,0855	1,0899
Grenzviskositätszahl η [ml/g]		**1957**	**1923**	**1580**	**1512**	**1452**	**1447**	**1298**	**1171**	**1011**			**319**	**334**
														326
prozentualer Anteil GVZ von N1		100	98,27	80,73	77,23	74,18	73,91	66,31	59,85	51,66				
prozentuale Abnahme			-1,73	-19,27	-22,77	-25,82	-26,09	-33,69	-40,15	-48,34				

Messgenauigkeit

% Abweichung GVZ Messung a und b 4,90%

Messung der Viskosität

	17.05.11							16.03.11			23.09.12			
	Ubbelohde 501 13 / Ic							Ubbelohde 501 13 / Ic			Ubbelohde 537 13 / Ic			
Probe	**EWNN**	**H-18-E2**	**H-18-E2-Cu**	**H-17/18-D**	**N1-A-K4-u**	**N1-A-K4-g**	**H-16/17-M (S)**	**EWNN**	**H-19-T2 a**	**H-19-T2 b**	**EWNN_a**	**EWNN_b**	**H-20-U5 (K) a**	**H-20-U5 (K) b**
Masse Fasern feucht [g]		0,0070	0,0066	0,0070	0,0070	0,0070	0,0070		0,0140	0,0140			0,0028	0,0028
Feuchtezuschlag [%] 18°C/60%rF		6,08	6,08	6,10	7,09	7,11	6,07		6,90	6,90			7,00	7,00
Masse Fasern trocken [g]		0,006574	0,006199	0,006573	0,006504	0,006502	0,006575		0,013034	0,013034			0,002604	0,002604
Menge Lösungsmittel [ml]		25,0	23,5	25,0	25,0	25,0	25,0		50,0	50,0			10,0	10,0
Konzentration c [g/ml]		0,000263	0,000264	0,000263	0,000260	0,000260	0,000263		0,000261	0,000261			0,000260	0,000260
Durchflusszeit t [s]	104,6	109,5	107,1	110,7	158,7	155,9	112,5	103,7	113,2	113,3	95,8	95,8	122,5	122,0
	104,7	109,5	107,2	110,8	158,7	156,0	112,4	103,8	113,4	113,2	95,7	95,7	122,5	122,0
	104,7	109,5	107,0	110,6	158,4	155,8	112,3	103,8	113,3	113,2	95,7	95,8	122,3	122,2
	104,6	109,4	107,1	110,5	158,7	155,6	112,5	103,7	113,3	113,4	95,7	95,9	122,3	122,1
	104,5	109,4	107,1	110,7	158,6	155,6	112,3	103,8	113,2	113,3	95,6	95,9	122,4	122,2
t [s] ∅	104,6	109,5	107,1	110,7	158,6	155,8	112,4	103,8	113,3	113,3	95,7	95,8	122,4	122,1
Korrekturwert Bezug	105	110	105	110	160	155	110	105	115	115	95	95		
Korrekturwert [s]	0,16	0,14	0,16	0,14	0,06	0,07	0,14	0,16	0,13	0,13	0,01	0,01	0,00	0,00
korrigierte Durchflusszeit t [s]	104,5	109,3	106,9	110,5	158,5	155,7	112,2	103,6	113,2	113,2	95,7	95,8	122,4	122,1
relative Viskosität		1,0465	1,0238	1,0582	1,5178	1,4908	1,0745		1,0921	1,0921			1,2792	1,2761
Grenzviskositätszahl η [ml/g]		**174**	**90**	**217**	**1693**	**1618**	**276**		**343**	**343**			**979**	**970**
Mittelwert GVZ										**343**				**975**
prozentualer Anteil GVZ von N1					86,51	82,66								
prozentuale Abnahme					-13,49	-17,34								
Messgenauigkeit														
% Abweichung GVZ Messung a und b										0,00%				1,02%

Messung der Viskosität 08.09.12

Ubbelohde 501 13 / Ic

Probe	EWNN a	EWNN b	N3 a	N3 b	N3-B1 a	N3-B1 b	N3-B2 a	N3-B2_b
Masse Fasern feucht [g]			0,0112	0,0112	0,0112	0,0112	0,0112	0,0112
Feuchtezuschlag [%] 18°C/60%rF			7,22	7,22	6,66	6,66	6,71	6,71
Masse Fasern trocken [g]			0,010391	0,010391	0,010454	0,010454	0,010448	0,010448
Menge Lösungsmittel [ml]			40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Konzentration c [g/ml]			0,000260	0,000260	0,000261	0,000261	0,000261	0,000261
Durchflusszeit t [s]	103,6	103,2	164,8	163,6	129,7	129,8	123,1	123,1
	103,4	103,3	165,2	163,6	129,8	129,8	123,0	123,1
	103,5	103,4	165,1	163,8	129,6	129,8	123,0	123,2
	103,4	103,2	164,8	163,7	129,8	129,7	122,9	123,3
	103,3	103,3	164,9	163,8	129,8	129,8	123,1	123,1
t [s] ∅	103,5	103,3	165,0	163,7	129,7	129,8	123,0	123,2
Korrekturwert Bezug	105	105	165	165	130	130	125	125
Korrekturwert [s]	0,16	0,16	0,06	0,06	0,10	0,10	0,11	0,11
korrigierte Durchflusszeit t [s]	103,3	103,1	164,9	163,6	129,6	129,7	122,9	123,1
relative Viskosität			1,5964	1,5842	1,2550	1,2556	1,1899	1,1913
Grenzviskositätszahl η [ml/g]			**1910**	**1877**	**898**	**900**	**683**	**688**
Mittelwert GVZ				**1893**		**899**		**685**
prozentualer Anteil GVZ von nicht gebl. Gewebe						47,48		36,19
prozentuale Abnahme						52,52		63,81
Messgenauigkeit								
% Abweichung GVZ Messung a und b				1,75%		0,20%		0,67%

09.09.12

Ubbelohde 501 13 / Ic

Probe	EWNN a	EWNN b	N4 a	N4 b	N4-B1 a	N4-B1 b
Masse Fasern feucht [g]			0,0112	0,0112	0,0112	0,0112
Feuchtezuschlag [%] 18°C/60%rF			7,35	7,35	7,00	7,00
Masse Fasern trocken [g]			0,010377	0,010377	0,010416	0,010416
Menge Lösungsmittel [ml]			40,0	40,0	40,0	40,0
Konzentration c [g/ml]			0,000259	0,000259	0,000260	0,000260
Durchflusszeit t [s]	103,1	103,0	164,6	164,6	128,3	128,6
	103,2	103,0	164,7	165,0	128,4	128,4
	103,3	103,0	164,8	165,1	128,3	128,5
	103,3	103,0	164,7	165,1	128,4	128,5
	103,2	103,2	164,5	165,1	128,4	128,4
t [s] ∅	103,2	103,1	164,7	165,0	128,4	128,5
Korrekturwert Bezug	105	105	165	165	130	130
Korrekturwert [s]	0,16	0,16	0,06	0,06	0,10	0,10
korrigierte Durchflusszeit t [s]	103,1	102,9	164,6	164,9	128,3	128,4
relative Viskosität			1,5973	1,6004	1,2446	1,2456
Grenzviskositätszahl η [ml/g]			**1915**	**1923**	**867**	**871**
Mittelwert GVZ				**1919**		**869**
prozentualer Anteil GVZ von nicht gebl. Gewebe						45,29
prozentuale Abnahme						54,71
Messgenauigkeit						
% Abweichung GVZ Messung a und b				0,44%		0,39%

Messung der Viskosität 10.09.12

Ubbelohde 501 13 / Ic

Probe	**EWNN a**	**EWNN b**	**N2 a**	**N2 b**	**N2-B1 a**	**N2-B1 b**	**N5 a**	**N5b**	**N5-B1 a**	**N5-B1 b**
Masse Fasern feucht [g]			0,0112	0,0112	0,0112	0,0112	0,0112	0,0112	0,0112	0,0112
Feuchtezuschlag [%] 18°C/60%rF			7,55	7,55	6,53	6,53	8,15	8,15	6,95	6,95
Masse Fasern trocken [g]			0,010354	0,010354	0,010469	0,010469	0,010287	0,010287	0,010422	0,010422
Menge Lösungsmittel [ml]			40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0	40,0
Konzentration c [g/ml]			0,000259	0,000259	0,000262	0,000262	0,000257	0,000257	0,000261	0,000261
Durchflusszeit t [s]	103,4	103,2	165,4	164,9	127,7	127,8	162,4	161,6	130,8	130,6
	103,4	103,4	165,3	165,1	127,7	127,7	162,3	161,7	130,8	130,5
	103,6	103,2	165,1	164,9	127,7	127,8	162,3	161,5	130,8	130,7
	103,6	103,2	165,1	165,1	127,8	127,7	162,2	161,6	130,6	130,6
	103,6	103,2	165,6	164,8	127,5	127,6	162,2	161,6	130,7	130,6
t [s] ∅	103,5	103,2	165,3	165,0	127,7	127,7	162,3	161,6	130,7	130,6
Korrekturwert Bezug	105	105	165	165	130	130	160	160	130	130
Korrekturwert [s]	0,16	0,16	0,06	0,06	0,10	0,10	0,06	0,06	0,10	0,10
korrigierte Durchflusszeit t [s]	103,3	103,1	165,2	164,9	127,6	127,6	162,2	161,5	130,6	130,5
relative Viskosität			1,5990	1,5959	1,2345	1,2349	1,5696	1,5631	1,2642	1,2627
Grenzviskositätszahl η [ml/g]			**1923**	**1915**	**830**	**831**	**1856**	**1839**	**931**	**926**
Mittelwert GVZ				**1919**		**831**		**1847**		**928**
prozentualer Anteil GVZ von nicht gebl. Gewebe						43,29				50,24
prozentuale Abnahme						56,71				49,76
Messgenauigkeit										
% Abweichung GVZ Messung a und b				0,43%		0,13%		0,97%		0,52%

Messung der Viskosität 12.09.12

Ubbelohde 537 13 / Ic

Probe	**EWNN a**	**EWNN b**	**H-20-H1 a**	**H-20-H1 b**	**H-20-H2 a**	**H-20-H2 b**	**H-19-M (K) a**	**H-19-M (K) b**	**H-18-E1 a**	**H-18-E1 b**
Masse Fasern feucht [g]			0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028
Feuchtezuschlag [%] 18°C/60%rF			6,75	6,75	6,39	6,39	6,55	6,55	6,08	6,08
Masse Fasern trocken [g]			0,002611	0,002611	0,002621	0,002621	0,002617	0,002617	0,002630	0,002630
Menge Lösungsmittel [ml]			10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Konzentration c [g/ml]			0,000261	0,000261	0,000262	0,000262	0,000262	0,000262	0,000263	0,000263
Durchflusszeit t [s]	96,0	95,9	105,2	105,0	106,6	106,7	105,0	104,7	102,5	102,6
	96,1	95,9	105,0	105,0	106,4	106,8	104,9	104,7	102,7	102,5
	96,0	95,8	105,1	105,1	106,5	106,6	104,9	104,7	102,7	102,5
	96,0	95,8	105,1	105,0	106,5	106,7	104,8	104,8	102,7	102,4
	96,1	95,9	105,1	105,0	106,4	106,6	104,8	104,7	102,6	102,5
t [s] ∅	96,0	95,9	105,1	105,0	106,5	106,7	104,9	104,7	102,6	102,5
Korrekturwert Bezug	95	95								
Korrekturwert [s]	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
korrigierte Durchflusszeit t [s]	96,0	95,9	105,1	105,0	106,5	106,7	104,9	104,7	102,6	102,5
relative Viskosität			1,0943	1,0935	1,1089	1,1110	1,0920	1,0904	1,0687	1,0674
Grenzviskositätszahl η [ml/g]			**350**	**347**	**401**	**408**	**341**	**335**	**255**	**251**
Mittelwert GVZ				**349**		**404**		**338**		**253**

Messgenauigkeit

% Abweichung GVZ Messung a und b				0,82%		1,91%		1,73%		1,77%

Messung der Viskosität 21.09.12

Ubbelohde 537 13 / Ic

Probe	EWNN a	EWNN b	H-20-U1 a	H-20-U1 b	H-20-U2 a	H-20-U2 b	H-20-U3 a	H-20-U3 b	H-20-U4 a	H-20-U4 b	H-16/17-M (K) a	H-16/17-M (K) b
Masse Fasern feucht [g]			0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028
Feuchtezuschlag [%] 18°C/60%rF			7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	7,00	6,07	6,07
Masse Fasern trocken [g]			0,002604	0,002604	0,002604	0,002604	0,002604	0,002604	0,002604	0,002604	0,002630	0,002630
Menge Lösungsmittel [ml]			10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Konzentration c [g/ml]			0,000260	0,000260	0,000260	0,000260	0,000260	0,000260	0,000260	0,000260	0,000263	0,000263
Durchflusszeit t [s]	96,0	95,7	115,2	115,3	106,7	106,6	111,8	111,8	121,4	121,5	104,2	104,2
	95,9	95,7	115,4	115,3	106,8	106,7	111,9	111,8	121,6	121,4	104,2	104,2
	96,1	95,7	115,2	115,1	106,7	106,8	111,8	111,8	121,5	121,4	104,4	104,3
	96,0	95,8	115,2	115,1	106,7	106,7	111,6	111,7	121,4	121,5	104,3	104,3
	96,1	95,6	115,3	115,1	106,7	106,8	111,6	111,7	121,4	121,6	104,2	104,3
t [s] ∅	96,0	95,7	115,3	115,2	106,7	106,7	111,8	111,8	121,5	121,5	104,2	104,3
Korrekturwert Bezug	95	95										
Korrekturwert [s]	0,01	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
korrigierte Durchflusszeit t [s]	96,0	95,7	115,3	115,2	106,7	106,7	111,8	111,8	121,5	121,5	104,2	104,3
relative Viskosität			1,2006	1,1997	1,1116	1,1115	1,1642	1,1642	1,2652	1,2651	1,0858	1,0860
Grenzviskositätszahl η [ml/g]			**721**	**718**	**413**	**413**	**597**	**597**	**934**	**934**	**317**	**318**
Mittelwert GVZ				**720**		**413**		**597**		**934**		**318**
Messgenauigkeit												
% Abweichung GVZ Messung a und b				0,45%		0,08%		0,03%		0,01%		0,25%

B.5 Infrarot-Spektroskopie

B.5.1 Ergebnisse

Tabelle B.4: Mittelwerte des Kristallinitätsindexes (C. I.) aus Einzelmessungen aus Tabelle B.5 mit dazugehörigen Standardabweichungen.

	C. I.	Standardabweichung
N1	0,75	0,08
N1-A-X168-K4-u	0,72	0,08
N1-A-K10-u	0,78	0,11
N1-A-K10-g	0,82	0,09
N1-A-T105	0,81	0,08
H-16/17-M	0,81	0,09
H-17/18-D	0,57	0,10
H-18-E1	0,65	0,12
H-19-T2	0,85	0,11
N2	0,86	0,11
N2-B1	0,75	0,06
N3	0,69	0,04
N3-B2	0,75	0,03
N5	0,80	0,12
N5-B1	0,81	0,06

Tabelle B.5: Messergebnisse der Intensität der Transmissionsminima zur Berechnung des Kristallintitätsindexes.

	Höhe Transmissionsminimum [mm] bei		C. I.		Höhe Transmissionsminimum [mm] bei		C. I.
	2900 cm^{-1}	1372 cm^{-1}			2900 cm^{-1}	1372 cm^{-1}	
N1	28,1	24,3	0,86	**H-16/17-M**	28,5	24,5	0,86
	28,9	22,8	0,79		30,5	28,1	0,92
	29,9	23,9	0,80		30,3	22,8	0,75
	29,7	25,5	0,86		32,4	24,4	0,75
	30,4	26,0	0,86		31,7	28,7	0,91
	30,3	26,4	0,87		33,0	21,6	0,65
	27,7	22,9	0,83		35,0	24,8	0,71
	29,6	22,1	0,75		39,9	32,4	0,81
	30,1	23,9	0,79		41,4	33,3	0,80

	Höhe Transmissionsminimum [mm] bei		C. I.		Höhe Transmissionsminimum [mm] bei		C. I.
	2900 cm^{-1}	1372 cm^{-1}			2900 cm^{-1}	1372 cm^{-1}	
	29,7	23,9	0,80		40,4	33,5	0,83
	24,2	18,9	0,78		36,5	31,9	0,87
	26,9	23,2	0,86		36,1	30,3	0,84
	27,3	19,7	0,72		42,6	30,5	0,72
	27,5	23,1	0,84		32,1	25,4	0,79
	25,5	19,3	0,76		31,4	25,3	0,81
	27,5	21,3	0,77		31,8	25,4	0,80
	27,3	20,6	0,75		31,7	25,4	0,80
	27,4	20,8	0,76		31,3	25,6	0,82
	27,8	22,1	0,79		30,3	26,4	0,87
	30,1	24,8	0,82		31,6	31,4	0,99
	29,8	24,5	0,82		27,1	24,0	0,89
	30,0	24,6	0,82		26,1	21,7	0,83
	38,6	27,1	0,70		29,8	28,0	0,94
	34,6	27,7	0,80		51,9	33,9	0,65
	41,5	30,1	0,73		54,3	38,7	0,71
	44,4	29,1	0,66				
N1-A-X168-K4-u	55.1	34,6	0,628	**N1-A-K105-u**	28,6	24,7	0,864
	51,5	37,3	0,724		23,9	24,6	1,029
	51,3	37.7	0,735		29,7	22,4	0,754
	53,8	34,9	0,649		29,5	22,8	0,773
	41,4	35,3	0,853		27,4	23,7	0,865
	46	34,6	0,752		29,3	25,5	0,870
	57,9	37,1	0,641		31,0	26,2	0,845
	53,7	32,9	0,613		33,0	27,5	0,833
	54,8	35,7	0,651		35,8	29,9	0,835
	51,7	37,1	0,718		35,6	28,7	0,806
	47,8	32,1	0,672		39,0	27,5	0,705
	46,1	33,0	0,716		38,0	26,5	0,697
	44,6	31,3	0,702		37,2	26,2	0,704
	52,6	41,2	0,783		30,3	24,5	0,809
	55,5	41,1	0,741		30,8	26,9	0,873
	44,8	35,3	0,788		35,1	29,7	0,846
	60,7	39,7	0,654		37,4	31,2	0,834
	44,8	32,6	0,728		32,6	29,5	0,905
	35,0	30,2	0,863		37,0	26,3	0,711
	52,8	34,0	0,644		36,8	24,8	0,674
	56,3	38,9	0,691		38,8	27,1	0,698
	39,56	30,9	0,781		42,9	31,7	0,739
	37,7	29,36	0,779		42,9	31,7	0,739
	38,2	28,0	0,733		42,9	34,4	0,802

	Höhe Transmissions-minimum [mm] bei		C. I.		Höhe Transmissions-minimum [mm] bei		C. I.
	2900 cm^{-1}	1372 cm^{-1}			2900 cm^{-1}	1372 cm^{-1}	
	37,46	26,72	0,713		41,8	31,9	0,763
	34,5	28,76	0,834		39,8	29,9	0,751
	37,9	30,38	0,802		42,7	29,9	0,700
	35,24	30,04	0,852		35,6	30,8	0,865
	36,72	29,96	0,816		34,6	29,4	0,850
	35,1	18,5	0,527		36,6	32,0	0,874
	36,0	20,3	0,564		36,3	32,7	0,901
	33,9	24,5	0,723		33,8	29,2	0,864
	26,5	19,8	0,747		32,0	28,7	0,897
					29,5	27,2	0,922
N1-A-K10-g	36,8	35,3	0,959	**H-19-T2**	33,4	29,4	0,880
	46,6	34,3	0,736		32,8	30,1	0,918
	46,9	36,2	0,772		34,8	34,1	0,980
	46,6	37,8	0,815		29,1	29,8	1,024
	46,5	35,4	0,761		27,5	28,5	1,036
	44,1	38,1	0,864		31,0	27,5	0,887
	46,5	33,7	0,725		30,7	28,0	0,912
	43,3	32,6	0,753		31,8	24,0	0,755
	45,1	32,9	0,729		30,9	28,6	0,926
	43,3	32,8	0,758		30,1	32,3	1,073
	42,4	32,6	0,769		34,9	31,7	0,908
	43,5	30,4	0,699		38,4	26,2	0,682
	45,5	36,1	0,793		38,3	26,1	0,681
	39,7	32,6	0,821		39,6	28,1	0,710
	39,1	30,6	0,783		33,8	28,6	0,846
	44,6	30,9	0,693		37,9	29,8	0,786
	45,6	35,3	0,774		32,0	30,2	0,944
	39,8	35,1	0,882		33,3	27,5	0,826
	47,5	38,2	0,804		35,4	32,0	0,904
	45,9	40,8	0,889		30,7	25,9	0,844
	47,7	36,4	0,763		32,2	28,4	0,882
	40,6	41,1	1,012		44,8	32,2	0,719
	42,9	43,5	1,014		43,8	32,9	0,751
	42,7	41,7	0,977		39,7	36,1	0,909
	50,9	41,2	0,809		43,8	31,7	0,724
	44,0	36,4	0,827		42,2	28,3	0,671
	42,9	31,4	0,732		32,3	28,1	0,870
	43,5	34,9	0,802		35,3	25,8	0,731
	39,2	39,1	0,997		36,0	26,3	0,731
N1-A-K10-u	45,0	36,2	0,804	**H-17/18-D**	55,8	23,2	0,416
	43,6	31,2	0,716		44,3	22,6	0,510

	Höhe Transmissions-minimum [mm] bei		C. I.		Höhe Transmissions-minimum [mm] bei		C. I.
	2900 cm^{-1}	1372 cm^{-1}			2900 cm^{-1}	1372 cm^{-1}	
	46,5	35,2	0,757		47,8	25,1	0,525
	42,0	32,8	0,781		39,0	18,8	0,482
	49,6	33,4	0,673		37,2	20,9	0,562
	56,1	36,3	0,647		43,4	19,0	0,438
	50,3	30,6	0,608		40,2	24,3	0,604
	41,6	34,8	0,837		46,0	25,8	0,561
	35,7	31,7	0,888		37,7	22,8	0,605
	31,0	29,6	0,955		34,8	23,5	0,675
	47,0	33,3	0,709		45,3	23,1	0,510
	34,6	32,9	0,951		46,6	21,5	0,461
	49,5	39,6	0,800		36,8	23,6	0,641
	40,7	34,4	0,845		43,4	23,2	0,535
	41,5	28,8	0,694		30,7	23,1	0,752
	28,7	25,4	0,885		33,8	25,3	0,749
	25,8	23,0	0,891		36,8	24,6	0,668
H-18-E1	28,4	21,0	0,739	**N3-B2**	41,18	28,62	0,695
	30,0	22,8	0,760		38,5	28,62	0,743
	26,7	20,4	0,764		36,46	28,24	0,775
	28,2	19,6	0,695		38,36	31,28	0,815
	28,3	13,1	0,463		48,24	34,5	0,715
	23,8	12,2	0,513		46,54	35,34	0,759
	33,6	22,3	0,664		24,42	18,52	0,758
	35,8	23,1	0,645		32,12	24,8	0,772
	28,9	22,6	0,782		39,7	28,64	0,721
	33,8	24,0	0,710		39,7	28,26	0,712
	34,6	15,4	0,445		30,68	24,9	0,812
N2	37,04	31,96	0,863	**N5-B1**	43,0	32,88	0,765
	48,14	38,74	0,805		41,5	32,5	0,783
	40,08	34,82	0,869		39,34	34,58	0,879
	31,1	32,28	1,038		42,66	33,84	0,793
	34,0	36,94	1,086		42,82	31,66	0,739
	40,34	34,52	0,856		41,18	32,42	0,787
	40,62	40,12	0,988		41,34	33,92	0,821
	37,82	34,28	0,906		44,48	30,9	0,695
	42,34	35,98	0,850		36,74	32,68	0,889
	33,08	32,7	0,989		35,0	32,88	0,939
	37,18	34,4	0,925		38,22	33,16	0,868
	40,76	33,24	0,816		43,66	31,28	0,716
	35,14	30,48	0,867		43,66	32,32	0,740
	33,08	25,0	0,756		42,04	33,44	0,795
	35,78	24,92	0,696		42,04	32,8	0,780

	Höhe Transmissions-minimum [mm] bei		C. I.		Höhe Transmissions-minimum [mm] bei		C. I.
	2900 cm^{-1}	**1372 cm^{-1}**			**2900 cm^{-1}**	**1372 cm^{-1}**	
	37,36	25,86	0,692		39,24	33,16	0,845
	35,44	25,36	0,716		47,32	37,14	0,785
	30,7	25,34	0,825		47,62	40,26	0,845
	38,0	28,26	0,744		47,18	40,72	0,863
	33,02	30,3	0,918		44,38	37,26	0,840
N3	32,5	24,12	0,742	**N5**	31,22	28,6	0,916
	30,9	23,82	0,771		33,72	32,52	0,964
	29,42	22,08	0,751		33,32	31,58	0,948
	28,9	20,72	0,717		39,42	32,26	0,818
	29,1	20,56	0,707		34,0	31,42	0,924
	28,68	20,56	0,717		34,66	31,42	0,907
	27,0	19,28	0,714		47,64	35,16	0,738
	23,64	17,86	0,755		46,7	27,66	0,592
	36,44	23,9	0,656		48,16	42,44	0,881
	36,8	23,56	0,640		34,0	33,46	0,984
	37,28	23,46	0,629		39,68	31,42	0,792
	37,76	24,16	0,640		45,9	30,04	0,654
	38,72	25,34	0,654		36,16	28,28	0,810
	36,44	25,7	0,705		37,92	28,08	0,741
	35,6	25,36	0,712		34,84	25,1	0,720
	35,84	25,78	0,719		33,06	24,06	0,728
	37,04	26,36	0,712		43,22	31,66	0,733
	45,12	27,6	0,612		42,34	35,84	0,846
	46,0	31,56	0,686		43,36	31,66	0,730
	47,48	31,86	0,671		42,04	23,88	0,568
	44,4	30,42	0,685		44,1	37,16	0,843
	36,44	24,66	0,677				
N2-B1	38,2	25,86	0,677				
	37,04	31,24	0,843				
	39,52	28,78	0,728				
	36,04	25,0	0,694				
	37,7	28,52	0,756				
	30,6	26,22	0,857				
	39,52	27,9	0,706				
	38,22	29,48	0,771				
	42,08	29,3	0,696				
	39,04	28,82	0,738				
	37,04	25,8	0,697				
	35,2	24,96	0,709				
	33,72	26,28	0,779				
	36,66	29,4	0,802				

B.6 Bestimmung der mechanischen Eigenschaften

B.6.1 Streifen-Zugversuch an Geweben

Verwendete Geräte

Material-Prüfmaschine ZMART.PRO der Firma Zwick, Ulm (Baujahr 2004), Type 1445MOPS
Klemmbacken zum Schrauben
Kraftmessdosen: Firma A.S.T. Angewandte System Technik GmbH, Marschner Straße in Dresden.
untere: Typ: KAP-Z, Kl 0,05, 2.0 mV/V=1kN
obere: Typ: KAP-Z, Kl 0,05, 2,00 mV/V=10kN

Software: text Xpert V10.11

Tabelle B.6: Ergebnisse der Höchstzugkraft [N] von Geweben aus dem Streifen-Zugversuch. STABW=Standardabweichung

Gewebe	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Mittel-wert	STABW	Prozentualer Verlust von N1
N1	595,94	600,43	607,04	533,04	560,59	579	32	0
N1-A-TL	475,45	555,97	571,97	579,62	551,61	547	42	- 6 %
N1-A-X84	547,62	628,11	535,68	619,37	-	583	48	+ 1 %
N1-A-X168	529,23	586,27	520,98	519,60	564,96	544	30	- 6 %
N1-A-K4-u	569,29	558,26	530,96	550,55	471,16	536	39	- 7 %
N1-A-K4-g	605,82	476,76	535,61	568,41	551,16	548	47	- 5 %
N1-A-K10-u	560,70	535,25	546,20	554,53	547,96	549	10	- 5 %
N1-A-K10-g	504,94	537,48	557,93	526,34	468,28	519	34	- 10 %
N1-A-TL-K4-u	609,04	549,15	499,52	500,23	586,06	549	50	- 5 %
N1-A-X84-K4-u	478,43	472,50	490,04	446,12	456,09	469	18	- 19 %
N1-A-X168-K4-u	402,73	456,78	393,44	445,73	409,36	422	28	- 27 %

Tabelle B.7: Ergebnisse der Höchstzugkraftdehnung [%] von Geweben aus dem Streifen-Zugversuch. STABW=Standardabweichung

Gewebe	Messung 1	Messung 2	Messung 3	Messung 4	Messung 5	Mittel-wert	STABW	Prozentuale Veränderung zu N1
N1	12,67	12,71	13,57	12,95	16,46	13,67	1,6	0
N1-A-TL	17,44	18,61	18,80	18,51	19,42	18,55	0,72	+ 35,72
N1-A-X84	14,24	10,90	11,51	11,74	-	12,10	1,47	- 11,52
N1-A-X168	14,44	12,19	13,19	12,85	11,87	12,91	1,0	- 5,57
N1-A-K4-u	16,62	15,44	16,01	15,89	16,22	16,04	0,43	+ 17,30
N1-A-K4-g	9,86	7,84	12,12	10,91	9,27	10,00	1,62	- 26,85
N1-A-K10-u	13,18	12,69	13,20	12,60	11,27	12,59	0,79	- 7,92
N1-A-K10-g	5,02	5,41	5,10	5,65	5,60	5,36	0,28	- 60,83
N1-A-TL-K4-u	15,75	17,08	16,18	15,27	16,12	16,08	0,67	+ 17,63
N1-A-X84-K4-u	11,86	12,24	13,71	12,42	13,23	12,69	0,76	- 7,15
N1-A-X168-K4-u	11,99	11,33	11,26	10,14	12,97	11,54	1,04	- 15,59

B.6.2 Nullzugfestigkeit an Garnabschnitten

Ergebnisse

Tabelle B.8: Einzelergebnisse der Probenmasse m [g] von Garnabschnitten der Länge 5 mm, daraus berechnete Feinheit Tt [tex]. Ergebnisse der Höchstzugkraft F_H [cN] und der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft f_H [cN/tex] mit Mittelwerten und Standardabweichungen (STABW).

N1 (K)					
m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00108	216	631	2,921		
0,00114	228	709	3,110		
0,00096	192	549	2,859		
0,00126	252	702	2,786		
0,00148	296	765	2,584		
0,00122	244	742	3,041		
0,00124	248	395	1,593		
0,00140	280	752	2,686		
0,0010	200	621	3,105		
0,0011	220	606	2,755	2,744	0,441

N1 (S)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00128	256	523	2,043		
0,00122	244	562	2,303		
0,00078	156	302	1,936		
0,00126	252	520	2,063		
0,00110	220	449	2,041		
0,00138	276	508	1,841		
0,00110	220	481	2,186		
0,00092	184	315	1,712		
0,00102	204	567	2,779		
0,0013	260	577	2,219	2,112	0,294

N1-A-X84 (K)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00134	268	530	1,978		
0,00134	268	802	2,993		
0,00144	288	737	2,559		
0,00106	212	590	2,783		
0,0014	280	756	2,700		
0,00162	324	852	2,630		
0,00156	312	664	2,128		
0,00122	244	828	3,393		
0,00144	288	739	2,566		
0,00126	252	706	2,802	2,653	0,402

N1-A-X84 (S)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00078	156	324	2,077		
0,00098	196	266	1,357		
0,00090	180	380	2,111		
0,00098	196	428	2,184		
0,00102	204	354	1,735		
0,00076	152	303	1,993		
0,00086	172	278	1,616		
0,00088	176	166	0,943		
0,00098	196	330	1,684		
0,00100	200	315	1,575	1,728	0,386

N1-A-X84-K4-u (K)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00150	300	678	2,260		
0,00156	312	677	2,170		
0,00130	260	674	2,592		
0,00092	184	556	3,022		
0,00106	212	696	3,283		
0,00146	292	660	2,260		
0,00154	308	695	2,256		
0,0010	200	608	3,040		
0,00084	168	594	3,536		
0,0013	260	711	2,735	2,715	0,487

N1-A-X84-K4-u (S)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00104	208	483	2,322		
0,00096	192	397	2,068		
0,00102	204	578	2,833		
0,00078	156	379	2,429		
0,00102	204	448	2,196		
0,0010	200	366	1,830		
0,0010	200	355	1,775		
0,00094	188	525	2,793		
0,00086	172	467	2,715		
0,00102	204	502	2,461	2,342	0,378

H-16/17-M (K)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00062	124	12,5	0,101		
0,00054	108	18,4	0,170		
0,00046	92	10,7	0,116		
0,00050	100	9,69	0,097		
0,00050	100	25,0	0,250		
0,00054	108	8,73	0,081		
0,00048	96	25,7	0,268		
0,00044	88	14,7	0,167		
0,00052	104	18,1	0,174		
0,00044	88	14,6	0,166	0,159	0,063

H-17/18-D (K)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00062	124	12,2	0,098		
0,00048	96	8,80	0,092		
0,00044	88	8,75	0,099		
0,00080	160	16,5	0,103		
0,00062	124	14,2	0,115		
0,00052	104	8,04	0,077		
0,00060	120	21,1	0,176		
0,00056	112	32,9	0,294	0,132	0,072

H-18-E1 (K)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00014	28	1,35	0,048		
0,00014	28	8,52	0,304		
0,00016	32	10,1	0,316		
0,00022	44	4,54	0,103		
0,00018	36	1,00	0,028		
0,00024	48	2,31	0,048		
0,00040	80	5,03	0,063		
0,00020	40	3,89	0,097		
0,00014	28	3,59	0,128	0,126	0,109

H-19-M (K)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00068	136	42,5	0,313		
0,00070	140	17,5	0,125		
0,00026	52	14,8	0,285		
0,00034	68	26,5	0,390		
0,00042	84	38,7	0,461		
0,00048	96	34,0	0,354		
0,00050	100	16,4	0,164		
0,00050	100	40,1	0,401		
0,00054	108	50,8	0,470		
0,00066	132	35,6	0,270	0,323	0,116

H-19-T1 (S)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00028	56	44,0	0,786		
0,00034	68	10,9	0,160		
0,00032	64	7,01	0,110		
0,00038	76	9,46	0,124		

0,00026	52	9,06	0,174		
0,00026	52	9,77	0,188		
0,00016	32	11,9	0,372		
0,00008	16	7,19	0,449		
0,00014	28	9,87	0,353		
0,00024	48	10,1	0,210	0,293	0,208

H-19-T2 (K)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00060	120	27,7	0,231		
0,00060	120	34,2	0,285		
0,00044	88	48,5	0,551		
0,00038	76	28,5	0,375		
0,00036	72	18,5	0,257		
0,00034	68	15,2	0,224		
0,00044	88	21,9	0,249		
0,00048	96	35,1	0,366		
0,00044	88	31,5	0,366		
0,00048	96	30,9	0,322	0,322	0,099

H-20-H1 (R2)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00098	196	124,0	0,633		
0,00062	124	42,2	0,340		
0,00084	168	47,1	0,280		
0,00066	132	46,1	0,349		
0,00054	108	35,9	0,332		
0,00042	84	45,4	0,540		
0,00042	84	29,4	0,350		
0,00046	92	56,8	0,617		
0,00052	104	49,2	0,473		
0,00018	36	40,9	1,136	0,505	0,255

H-20-H2 (K)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00104	208	83,3	0,400		
0,00100	200	72,4	0,362		
0,00074	148	103,0	0,696		
0,00058	116	34,4	0,297		
0,00082	164	73,7	0,449		
0,00096	192	118,0	0,615		
0,00110	220	55,5	0,252		

0,00092	184	126,0	0,685		
0,00118	236	96,8	0,410		
0,00122	244	90,9	0,373	0,454	0,157

H-20-U1 (R1)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00066	132	101,0	0,765		
0,00052	104	65,0	0,625		
0,00048	96	50,1	0,522		
0,00062	124	49,1	0,396		
0,00058	116	84,3	0,727		
0,00066	132	94,3	0,714		
0,00044	88	47,7	0,542		
0,00054	108	70,1	0,649		
0,00058	116	90,1	0,777		
0,00058	116	62,4	0,538	0,625	0,124

H-20-U2 (K)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00098	196	49,3	0,252		
0,00098	196	79,0	0,403		
0,00098	196	79,1	0,404		
0,00078	156	78,4	0,503		
0,00112	224	106,0	0,473		
0,00104	208	46,8	0,225		
0,00092	184	49,9	0,271		
0,00094	188	36,6	0,195		
0,00082	164	79,9	0,487		
0,00104	208	45,2	0,217	0,343	0,123

H-20-U3 (R2)

m [g]	Tt [tex]	F_H [cN]	f_H [cN/tex]	Mittelwert f_H [cN/tex]	STABW
0,00044	88	22,8	0,259		
0,00054	108	87,4	0,809		
0,00042	84	50,0	0,595		
0,00038	76	51,0	0,671		
0,00038	76	74,1	0,975		
0,00072	144	103,0	0,715		
0,00066	132	122,0	0,924		
0,00038	76	32,3	0,425		
0,00036	72	60,7	0,843		
0,00052	104	109,0	1,048	0,727	0,248

H-20-U4 (K)					
m [g]	**Tt [tex]**	**F_H [cN]**	**f_H [cN/tex]**	**Mittelwert f_H [cN/tex]**	**STABW**
0,00042	84	87,2	1,038		
0,00056	112	60,1	0,537		
0,00066	132	53,9	0,408		
0,00044	88	38,6	0,439		
0,00054	108	48,8	0,452		
0,00068	136	73,8	0,543		
0,00052	104	126,0	1,212		
0,00060	120	45,7	0,381		
0,00050	100	115,0	1,150		
0,00048	96	56,0	0,583	0,674	0,326
H-20-U5 (K)					
m [g]	**Tt [tex]**	**F_H [cN]**	**f_H [cN/tex]**	**Mittelwert f_H [cN/tex]**	**STABW**
0,00068	136	62,1	0,457		
0,00060	120	81,7	0,681		
0,00054	108	55,7	0,516		
0,00062	124	99,1	0,799		
0,00058	116	60,1	0,518		
0,00070	140	122,0	0,871		
0,00092	184	53,9	0,293		
0,00062	124	113,0	0,911		
0,00076	152	44,4	0,292		
0,00072	144	135,0	0,938	0,628	0,246

Tabelle B.9: Ergebnisse der Nullzugfestigkeit: Umrechnung der Höchstzugkraft F_H [N] (Mittelwert aller Messungen) in die Bruchkraft [g].

Probenname	F_H [N]	Bruchkraft [g]
H-16/17-M (K)	0,1581	16,12
H-17/18-D (K)	0,1531	15,61
H-18-E1 (K)	0,0448	4,57
H-19-M (K)	0,3169	32,30
H-19-T1 (S)	0,1239	13,18
H-19-T2 (K)	0,292	29,77
H-20-H1 (R1)	0,517	52,70
H-20-H2 (K)	0,854	87,05
H-20-U1 (R1)	0,7141	72,79
H-20-U2 (K)	0,6502	66,28
H-20-U3 (R2)	0,7123	72,61
H-20-U4 (K)	0,7051	71,88
H-20-U5 (K)	0,827	84,30

B.7 Bestimmung der Gleichgewichtsfeuchte durch Sorptionsisothermen

B.7.1 Statische Methode

Verwendete Geräte

Klimaschrank Vötsch VC 0034
Angaben des Herstellers: Zeitliche Temperaturschwankung in Nutzraummitte ± 0,1 bis ± 0,3 K; Temperaturabweichung räumlich ± 0,5 bis ± 1 K; Feuchteschwankung zeitlich in Nutzraummitte ± 1 bis ± 3 % rF

Externe Überprüfung der Umgebungsbedingungen im Klimaschrank:
Universalmessgerät mit Datenlogger: Almemo® 2590-4S mit Digitalsensor für Feuchte und Temperatur: FH AD 46-0.
Auflösung Feuchte: 0,1 %
Fa. Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH
Eichenfeldstraße 1, 83607 Holzkirchen
Die externe Messung der relativen Feuchte schwankte für die programmierten 80 % zwischen 78,5 und 79,5 %. Für die programmierten 30 %rF wurden Werte zwischen 30,9 und 31,4 % gemessen.

Waage
Mettler AE 166
Ablesbarkeit: 0,1mg
Reproduzierbarkeit (Standardabweichung): 0,1mg
Linearität: ±0,2mg

Messprotokolle

Sorptionsisothermen statische Methode im Klimaschrank 25 °C
Gewogene Massen in g

Gewebe sind zu Beginn der Messungen im Gleichgewicht 25°C 30%rF

graue Unterlegung=für Berechnung Feuchtezuschlag verwendet

rF [%]	rF [%]	Datum Uhrzeit	Masse Gewebe [g] abzüglich Masse Gefäß und seiner Feuchte							
Fühler 1	**Fühler 2**		**N1**	**N1-A-K4-u**	**N1-A-K4-g**	**N1-A-K10-u**	**N1-A-K10-g**	**N1-A-TL**	**N1-A-X84**	**N1-A-X168**
30,7	32,1	26.04.12 09:10	1,1167	1,1295	1,1877	1,1389	1,1033	1,1686	0,8480	0,9481
37,5	39,2	02.05.12 08:45	1,1245	1,1374	1,1959	1,1459	1,1101	1,1765	0,8542	0,9549
38,5	40,2	03.05.12 08:00	1,1252	1,1380	1,1965	1,1467	1,1107	1,1771	0,8545	0,9551
38,5	40,1	04.05.12 08:50	1,1239	1,1364	1,1952	1,1456	1,1096	1,1759	0,8533	0,9540
38,2	40,0	05.05.12 09:15	1,1238	1,1363	1,1950	1,1454	1,1095	1,1757	0,8533	0,9538
40,9	42,7	06.05.12 08:50	1,1245	1,1368	1,1958	1,1462	1,1102	1,1766	0,8535	0,9543
40,9	42,8	07.05.12 08:45	1,1252	1,1376	1,1965	1,1466	1,1107	1,1771	0,8540	0,9548
50,9	53,1	08.05.12 08:50	-	-	-	-	-	-	0,8605	0,9624
51,0	53,5	09.05.12 16:40	1,1357	1,1474	1,2071	1,1562	1,1202	1,1874	0,8619	0,9634
51,0	53,2	10.05.12 16:10	1,1359	1,1477	1,2075	1,1565	1,1207	1,1880	0,8624	0,9640
50,9	53,2	11.05.12 15:30	1,1362	1,1480	1,2077	1,1565	1,1209	1,1881	0,8625	0,9642
50,5	52,8	13.05.12 12:30	1,1338	1,1453	1,2053	1,1544	1,1181	1,1853	0,8600	0,9615
50,8	53,1	14.05.12 14:05	1,1341	1,1458	1,2056	1,1541	1,1185	1,1857	0,8600	0,9617
51,0	53,4	15.05.12 14:45	1,1343	1,1459	1,2060	1,1550	1,1188	1,1861	0,8603	0,9620
50,9	53,0	16.05.12 15:55	1,1345	1,1458	1,2056	1,1556	1,1200	1,1871	0,8601	0,9617
50,5	52,9	21.05.12 14:25	1,1353	1,1469	1,2067	1,1560	1,1203	1,1875	0,8615	0,9631
50,2	52,6	22.05.12 14:10	1,1351	1,1471	1,2067	1,1556	1,1198	1,1871	0,8617	0,9633
49,8	52,9	23.05.12 11:45	1,1352	1,1473	1,2070	1,1557	1,1202	1,1874	0,8622	0,9636
49,4	51,6	24.05.12 14:45	1,1338	1,1456	1,2053	1,1543	1,1183	1,1855	0,8603	0,9619
49,1	51,3	25.05.12 14:05	1,1330	1,1446	1,2046	1,1534	1,1175	1,1845	0,8596	0,9612
60,1	62,4	26.05.12 11:35	1,1429	1,1530	1,2146	1,1616	1,1262	1,1938	0,8659	0,9684
60,5	62,7	27.05.12 12:40	1,1443	1,1543	1,2158	1,1625	1,1277	1,1952	0,8666	0,9690
60,4	62,6	28.05.12 13:45	1,1450	1,1549	1,2167	1,1633	1,1286	1,1960	0,8677	0,9701
60,5	62,7	29.05.12 13:55	1,1454	1,1553	1,2172	1,1636	1,1290	1,1966	0,8680	0,9705
60,4	62,2	30.05.12 13:20	1,1450	1,1549	1,2167	1,1632	1,1282	1,1959	0,8673	0,9697
60,4	62,7	31.05.12 11:35	1,1457	1,1557	1,2174	1,1637	1,1290	1,1966	0,8682	0,9706
70,6	72,6	01.06.12 12:15	1,1610	1,1675	1,2331	1,1743	1,1427	1,2098	0,8781	0,9818
70,9	72,9	05.06.12 09:45	1,1607	1,1670	1,2326	1,1742	1,1422	1,2096	0,8769	0,9811
70,9	72,9	06.06.12 09:55	1,1601	1,1665	1,2320	1,1737	1,1416	1,2090	0,8763	0,9806
71,1	73,1	07.06.12 13:25	1,1612	1,1675	1,2333	1,1751	1,1435	1,2103	0,8779	0,9822
71,1	73,1	08.06.12 13:25	1,1621	1,1686	1,2342	1,1757	1,1438	1,2113	0,8789	0,9826
71,2	73,1	09.06.12 16:10	1,1610	1,1674	1,2330	1,1748	1,1425	1,2099	0,8774	0,9815
71,3	73,3	10.06.12 16:05	1,1614	1,1679	1,2334	1,1752	1,1430	1,2106	0,8778	0,9819
71,3	73,3	12.06.12 08:35	1,1620	1,1685	1,2340	1,1756	1,1435	1,2111	0,8786	0,9826
71,3	73,3	13.06.12 17:00	1,1621	1,1687	1,2342	1,1758	1,1436	1,2111	0,8786	0,9827
80,4	81,5	14.06.12 12:55	1,1804	1,1820	1,2523	1,1876	1,1599	1,2288	0,8920	0,9983
80,5	81,4	15.06.12 13:15	1,1806	1,1824	1,2525	1,1883	1,1603	1,2299	0,8925	0,9986
80,6	81,7	19.06.12 15:15	1,1812	1,1833	1,2536	1,1894	1,1610	1,2312	0,8935	0,9995
81,0	81,9	20.06.12 16:25	1,1825	1,1847	1,2548	1,1903	1,1622	1,2324	0,8950	1,0009
81,0	82,0	21.06.12 16:05	1,1825	1,1846	1,2547	1,1902	1,1618	1,2320	0,8946	1,0005
80,9	81,9	22.06.12 15:30	1,1812	1,1832	1,2532	1,1892	1,1603	1,2308	0,8932	0,9992
81,0	81,9	24.06.12 11:20	1,1812	1,1831	1,2526	1,1891	1,1603	1,2305	0,8930	0,9989
81,1	82,1	25.06.12 13:50	1,1811	1,1830	1,2532	1,1889	1,1597	1,2303	0,8927	0,9987
81,1	82,0	26.06.12 09:35	1,1808	1,1828	1,2532	1,1888	1,1606	1,2305	0,8931	0,9992

rF [%]	rF [%]	Datum Uhrzeit	Masse Gewebe in g abzüglich Masse Gefäß und seiner Feuchte							
Fühler 1	**Fühler 2**		**N1**	**N1-A-K4-u**	**N1-A-K4-g**	**N1-A-K10-u**	**N1-A-K10-g**	**N1-A-TL**	**N1-A-X84**	**N1-A-X168**
90,1	89,5	27.06.12 09:45	1,2179	1,2173	1,2899	1,2231	1,1917	1,2714	0,9214	1,0311
89,7	89,2	28.06.12 13:50	1,2190	1,2189	1,2907	1,2250	1,1932	1,2734	0,9234	1,0325
89,6	89,1	29.06.12 12:50	1,2188	1,2190	1,2905	1,2248	1,1931	1,2733	0,9232	1,0325
89,8	89,3	30.06.12 12:50	1,2199	1,2203	1,2919	1,2264	1,1941	1,2744	0,9247	1,0334
90,2	89,5	03.07.12 08:50	1,2194	1,2202	1,2919	1,2266	1,1939	1,2744	0,9239	1,0332
90,1	89,5	04.07.12 08:25	1,2198	1,2202	1,2917	1,2262	1,1938	1,2742	0,9234	1,0327
90,2	89,6	06.07.12 09:25	1,2203	1,2210	1,2922	1,2272	1,1945	1,2749	0,9244	1,0335
90,5	89,8	11.07.12 08:25	1,2199	1,2206	1,2917	1,2269	1,1941	1,2747	0,9237	1,0329
82,4	83,1	12.07.12 08:25	1,1911	1,1958	1,2625	1,2035	1,1683	1,2439	0,9016	1,0085
81,6	82,4	13.07.12 08:05	1,1900	1,1951	1,2619	1,2028	1,1675	1,2433	0,9009	1,0077
82,2	82,8	17.07.12 08:35	1,1894	1,1944	1,2610	1,2020	1,1671	1,2425	0,9003	1,0071
81,7	82,4	18.07.12 08:25	1,1911	1,1944	1,2610	1,2040	1,1674	1,2423	0,9005	1,0072
82,0	82,6	20.07.12 08:10	1,1888	1,1939	1,2603	1,2010	1,1662	1,2415	0,8998	1,0064
82,1	82,8	21.07.12 14:15	1,1885	1,1935	1,2601	1,2012	1,1661	1,2413	0,8993	1,0062
72,7	74,3	22.07.12 15:25	1,1703	1,1776	1,2418	1,1861	1,1510	1,2229	0,8862	0,9913
73,2	74,9	23.07.12 15:25	1,1699	1,1778	1,2418	1,1861	1,1503	1,2223	0,8862	0,9910
73,0	74,6	26.07.12 09:10	1,1715	1,1793	1,2433	1,1874	1,1521	1,2239	0,8881	0,9927
73,0	74,6	27.07.12 09:25	1,1715	1,1794	1,2431	1,1875	1,1522	1,2240	0,8881	0,9928
73,0	74,6	28.07.12 12:55	1,1717	1,1796	1,2434	1,1877	1,1523	1,2241	0,8884	0,9928
73,0	74,6	29.07.12 12:55	1,1712	1,1791	1,2431	1,1872	1,1519	1,2237	0,8881	0,9927
63,3	65,3	30.07.12 11:30	1,1558	1,1651	1,2274	1,1740	1,1378	1,2078	0,8758	0,9791
63,1	65,1	31.07.12 09:30	1,1554	1,1652	1,2273	1,1739	1,1379	1,2075	0,8759	0,9792
63,0	65,0	01.08.12 08:40	1,1555	1,1653	1,2274	1,1739	1,1382	1,2078	0,8763	0,9795
62,4	64,6	09.08.12 09:10	1,1540	1,1639	1,2258	1,1724	1,1365	1,2061	0,8751	0,9780
93,5	91,2	10.08.12 08:35	1,2514	1,2545	1,3229	1,2614	1,2211	1,3106	0,9484	1,0610
93,7	91,4	11.08.12 10:15	1,2531	1,2569	1,3249	1,2637	1,2228	1,3133	0,9495	1,0622
93,9	91,5	12.08.12 09:20	1,2542	1,2578	1,3248	1,2638	1,2224	1,3131	0,9489	1,0621
93,9	91,7	15.08.12 09:30	1,2550	1,2583	1,3254	1,2640	1,2227	1,3138	0,9485	1,0624
94,3	91,9	16.08.12 10:40	1,2551	1,2589	1,3257	1,2642	1,2223	1,3138	0,9502	1,0629
52,5	54,5	26.08.12 13:40	1,1429	1,1549	1,2147	1,1645	1,1269	1,1949	0,8669	0,9688
52,3	54,4	27.08.12 13:35	1,1418	1,1538	1,2135	1,1634	1,1260	1,1938	0,8659	0,9676
52,2	54,4	28.08.12 17:05	1,1418	1,1538	1,2135	1,1635	1,1262	1,1938	0,8661	0,9678
52,1	54,3	31.08.12 13:40	1,1422	1,1544	1,2141	1,1638	1,1268	1,1944	0,8668	0,9684
41,7	43,7	05.09.12 14:15	1,1316	1,1444	1,2034	1,1540	1,1173	1,1835	0,8592	0,9598
41,3	43,3	06.08.12 17:35	1,1290	1,1417	1,2005	1,1517	1,1145	1,1807	0,8566	0,9572
41,3	43,4	07.09.12 17:10	1,1291	1,1417	1,2005	1,1516	1,1145	1,1807	0,8565	0,9572
41,8	43,4	08.09.12 17:40	1,1302	1,1430	1,2017	1,1527	1,1157	1,1819	0,8579	0,9585
41,6	43,6	10.09.12 17:00	1,1304	1,1433	1,2021	1,1529	1,1162	1,1822	0,8582	0,9588
41,6	43,5	11.09.12 17:45	1,1312	1,1441	1,2027	1,1539	1,1170	1,1832	0,8587	0,9594
31,0	32,2	21.09.12 18:40	1,1181	1,1313	1,1893	1,1413	1,1047	1,1695	0,8484	0,9479
30,6	32,1	22.09.12 17:15	1,1179	1,1312	1,1892	1,1412	1,1045	1,1692	0,8484	0,9480
30,8	32,4	24.09.12 09:05	1,1176	1,1310	1,1891	1,1410	1,1042	1,1691	0,8483	0,9480

Sorptionsisothermen statische Methode im Klimaschrank 25 °C
Gewogene Massen in g

Gewebe sind zu Beginn der Messungen im Gleichgewicht 25°C 30%rF

graue Unterlegung=für Berechnung Feuchtezuschlag verwendet

rF [%]	rF [%]	Datum Uhrzeit	Masse Gewebe in [g] abzüglich Masse Gefäß und seiner Feuchte			
Fühler 1	**Fühler 2**		**N1-A-TL-K4-u**	**N1-A-X84-K4-u**	**N1-A-X168-K4-u**	**N1-A-T105-u**
30,7	32,1	26.04.12 09:10	1,2491	0,9233	0,8453	0,9421
37,5	39,2	02.05.12 08:45	1,2572	0,9294	0,8507	0,9481
38,5	40,2	03.05.12 08:00	1,2578	0,9299	0,8512	0,9486
38,5	40,1	04.05.12 08:50	1,2565	0,9288	0,8504	0,9478
38,2	40,0	05.05.12 09:15	1,2562	0,9287	0,8502	0,9476
40,9	42,7	06.05.12 08:50	1,2568	0,9290	0,8509	0,9485
40,9	42,8	07.05.12 08:45	1,2575	0,9295	0,8513	0,9486
50,9	53,1	08.05.12 08:50	1,2668	0,9367	0,8581	0,9561
51,0	53,5	09.05.12 16:40	1,2681	0,9375	0,8588	0,9568
51,0	53,2	10.05.12 16:10	1,2687	0,9381	0,8592	0,9572
50,9	53,2	11.05.12 15:30	1,2688	0,9383	0,8593	0,9572
50,5	52,8	13.05.12 12:30	1,2658	0,9358	0,8576	0,9557
50,8	53,1	14.05.12 14:05	1,2659	0,9356	0,8579	0,9560
51,0	53,4	15.05.12 14:45	1,2663	0,9362	0,8587	0,9568
50,9	53,0	16.05.12 15:55	1,2661	0,9362	0,8585	0,9566
50,5	52,9	21.05.12 14:25	1,2675	0,9373	0,8586	0,9568
50,2	52,6	22.05.12 14:10	1,2677	0,9374	0,8590	0,9569
49,8	52,9	23.05.12 11:45	1,2683	0,9378	0,8590	0,9569
49,4	51,6	24.05.12 14:45	1,2663	0,9362	0,8585	0,9564
49,1	51,3	25.05.12 14:05	1,2653	0,9352	0,8581	0,9560
60,1	62,4	26.05.12 11:35	1,2740	0,9420	0,8656	0,9633
60,5	62,7	27.05.12 12:40	1,2747	0,9425	0,8662	0,9637
60,4	62,6	28.05.12 13:45	1,2755	0,9436	0,8667	0,9642
60,5	62,7	29.05.12 13:55	1,2758	0,9439	0,8669	0,9644
60,4	62,2	30.05.12 13:20	1,2757	0,9431	0,8670	0,9645
60,4	62,7	31.05.12 11:35	1,2766	0,9440	0,8669	0,9644
70,6	72,6	01.06.12 12:15	1,2883	0,9537	0,8779	0,9749
70,9	72,9	05.06.12 09:45	1,2880	0,9528	0,8778	0,9763
70,9	72,9	06.06.12 09:55	1,2874	0,9524	0,8775	0,9761
71,1	73,1	07.06.12 13:25	1,2887	0,9537	0,8778	0,9766
71,1	73,1	08.06.12 13:25	1,2899	0,9545	0,8787	0,9767
71,2	73,1	09.06.12 16:10	1,2876	0,9533	0,8783	0,9764
71,3	73,3	10.06.12 16:05	1,2892	0,9537	0,8781	0,9765
71,3	73,3	12.06.12 08:35	1,2897	0,9544	0,8783	0,9764
71,3	73,3	13.06.12 17:00	1,2898	0,9545	0,8787	0,9770
80,4	81,5	14.06.12 12:55	1,3025	0,9660	0,8912	0,9939
80,5	81,4	15.06.12 13:15	1,3030	0,9661	0,8916	0,9943
80,6	81,7	19.06.12 15:15	1,3045	0,9672	0,8920	0,9950
81,0	81,9	20.06.12 16:25	1,3068	0,9686	0,8925	0,9953
81,0	82,0	21.06.12 16:05	1,3059	0,9680	0,8925	0,9949
80,9	81,9	22.06.12 15:30	1,3045	0,9671	0,8919	0,9945
81,0	81,9	24.06.12 11:20	1,3037	0,9667	0,8919	0,9947
81,1	82,1	25.06.12 13:50	1,3047	0,9667	0,8920	0,9949
81,1	82,0	26.06.12 09:35	1,3042	0,9669	0,8918	0,9948

rF [%]	rF [%]	Datum Uhrzeit	Masse Gewebe in g abzüglich Masse Gefäß und seiner Feuchte			
Fühler 1	**Fühler 2**		**N1-A-TL-K4-u**	**N1-A-X84-K4-u**	**N1-A-X168-K4-u**	**N1-A-T105-u**
90,1	89,5	27.06.12 09:45	1,3422	0,9946	0,9153	1,0246
89,7	89,2	28.06.12 13:50	1,3452	0,9965	0,9165	1,0264
89,6	89,1	29.06.12 12:50	1,3456	0,9966	0,9160	1,0263
89,8	89,3	30.06.12 12:50	1,3474	0,9978	0,9168	1,0266
90,2	89,5	03.07.12 08:50	1,3475	0,9974	0,9167	1,0255
90,1	89,5	04.07.12 08:25	1,3477	0,9973	0,9168	1,0267
90,2	89,6	06.07.12 09:25	1,3477	0,9978	0,9170	1,0268
90,5	89,8	11.07.12 08:25	1,3483	0,9975	0,9173	1,0270
82,4	83,1	12.07.12 08:25	1,3214	0,9767	0,8981	1,0045
81,6	82,4	13.07.12 08:05	1,3208	0,9763	0,8968	1,0034
82,2	82,8	17.07.12 08:35	1,3201	0,9757	0,8967	1,0021
81,7	82,4	18.07.12 08:25	1,3201	0,9758	0,8962	1,0020
82,0	82,6	20.07.12 08:10	1,3193	0,9750	0,8961	1,0026
82,1	82,8	21.07.12 14:15	1,3189	0,9750	0,8960	1,0022
72,7	74,3	22.07.12 15:25	1,3014	0,9623	0,8840	0,9878
73,2	74,9	23.07.12 15:25	1,3019	0,9623	0,8840	0,9872
73,0	74,6	26.07.12 09:10	1,3038	0,9639	0,8843	0,9877
73,0	74,6	27.07.12 09:25	1,3037	0,9640	0,8841	0,9876
73,0	74,6	28.07.12 12:55	1,3039	0,9641	0,8843	0,9877
73,0	74,6	29.07.12 12:55	1,3037	0,9639	0,8844	0,9877
63,3	65,3	30.07.12 11:30	1,2885	0,9520	0,8738	0,9755
63,1	65,1	31.07.12 09:30	1,2883	0,9519	0,8735	0,9750
63,0	65,0	01.08.12 08:40	1,2886	0,9523	0,8736	0,9749
62,4	64,6	09.08.12 09:10	1,2869	0,9510	0,8724	0,9736
93,5	91,2	10.08.12 08:35	1,3862	1,0242	0,9387	1,0558
93,7	91,4	11.08.12 10:15	1,3889	1,0255	0,9396	1,0570
93,9	91,5	12.08.12 09:20	1,3893	1,0263	0,9400	1,0575
93,9	91,7	15.08.12 09:30	1,3898	1,0258	0,9401	1,0579
94,3	91,9	16.08.12 10:40	1,3906	1,0264	0,9401	1,0577
52,5	54,5	26.08.12 13:40	1,2778	0,9435	0,8646	0,9644
52,3	54,4	27.08.12 13:35	1,2764	0,9425	0,8642	0,9640
52,2	54,4	28.08.12 17:05	1,2764	0,9428	0,8640	0,9639
52,1	54,3	31.08.12 13:40	1,2771	0,9432	0,8639	0,9639
41,7	43,7	05.09.12 14:15	1,2664	0,9354	0,8566	0,9549
41,3	43,3	06.08.12 17:35	1,2636	0,9330	0,8552	0,9536
41,3	43,4	07.09.12 17:10	1,2635	0,9328	0,8552	0,9535
41,8	43,4	08.09.12 17:40	1,2649	0,9342	0,8557	0,9539
41,6	43,6	10.09.12 17:00	1,2652	0,9345	0,8556	0,9538
41,6	43,5	11.09.12 17:45	1,2656	0,9351	0,8558	0,9541
31,0	32,2	21.09.12 18:40	1,2521	0,9246	0,8472	0,9438
30,6	32,1	22.09.12 17:15	1,2520	0,9243	0,8470	0,9437
30,8	32,4	24.09.12 09:05	1,2517	0,9243	0,8467	0,9432

Sorptionsisotherme HfBK Klimaschrank 25 °C
Gewogene Massen in g

Gewebe sind zu Beginn der Messungen im Gleichgewicht 25°C 30%rF

graue Unterlegung=für Berechnung Feuchtezuschlag verwendet

rF [%]	rF [%]	Datum Uhrzeit	Masse Gewebe in g abzüglich Masse Gefäß und seiner Feuchte								
Fühler 1	**Fühler 2**		**N2**	**N2-B1**	**N3**	**N3-B1**	**N3-B2**	**N4**	**N4-B1**	**N5**	**N5-B1**
30,7	32,1	26.04.12 09:10	0,5008	0,5697	0,6202	0,6605	0,5661	0,4706	0,5642	0,7668	0,6362
37,5	39,2	02.05.12 08:45	0,5048	0,5738	0,6245	0,6648	0,5704	0,4740	0,5678	0,7725	0,6406
38,5	40,2	03.05.12 08:00	0,5051	0,5741	0,6249	0,6652	0,5708	0,4743	0,5680	0,7729	0,6412
38,5	40,1	04.05.12 08:50	0,5043	0,5734	0,6244	0,6648	0,5705	0,4739	0,5677	0,7719	0,6403
38,2	40,0	05.05.12 09:15	0,5042	0,5732	0,6242	0,6646	0,5702	0,4737	0,5676	0,7717	0,6401
40,9	42,7	06.05.12 08:50	0,5046	0,5735	0,6248	0,6652	0,5707	0,4741	0,5681	0,7720	0,6405
40,9	42,8	07.05.12 08:45	0,5050	0,5740	0,6251	0,6653	0,5711	0,4741	0,5683	0,7725	0,6410
50,9	53,1	08.05.12 08:50	0,5093	0,5781	0,6309	0,6707	0,5767	0,4785	0,5730	0,7789	0,6458
51,0	53,5	09.05.12 16:40	0,5101	0,5789	0,6314	0,6713	0,5770	0,4790	0,5733	0,7803	0,6467
51,0	53,2	10.05.12 16:10	0,5104	0,5792	0,6316	0,6713	0,5772	0,4792	0,5735	0,7804	0,6469
50,9	53,2	11.05.12 15:30	0,5104	0,5793	0,6317	0,6716	0,5773	0,4794	0,5736	0,7808	0,6471
50,5	52,8	13.05.12 12:30	0,5090	0,5777	0,6308	0,6705	0,5764	0,4781	0,5728	0,7788	0,6454
50,8	53,1	14.05.12 14:05	0,5091	0,5780	0,6309	0,6703	0,5763	0,4787	0,5726	0,7789	0,6458
51,0	53,4	15.05.12 14:45	0,5095	0,5785	0,6302	0,6701	0,5761	0,4781	0,5719	0,7797	0,6463
50,9	53,0	16.05.12 15:55	0,5091	0,5784	0,6293	0,6696	0,5751	0,4775	0,5713	0,7797	0,6462
50,5	52,9	21.05.12 14:25	0,5097	0,5787	0,6312	0,6710	0,5768	0,4789	0,5731	0,7800	0,6466
50,2	52,6	22.05.12 14:10	0,5102	0,5790	0,6311	0,6710	0,5767	0,4788	0,5730	0,7806	0,6469
49,8	52,9	23.05.12 11:45	0,5102	0,5791	0,6312	0,6711	0,5769	0,4791	0,5731	0,7804	0,6469
49,4	51,6	24.05.12 14:45	0,5098	0,5786	0,6304	0,6703	0,5762	0,4781	0,5724	0,7799	0,6463
49,1	51,3	25.05.12 14:05	0,5093	0,5782	0,6299	0,6695	0,5755	0,4774	0,5715	0,7789	0,6458
60,1	62,4	26.05.12 11:35	0,5149	0,5824	0,6352	0,6742	0,5806	0,4811	0,5759	0,7873	0,6519
60,5	62,7	27.05.12 12:40	0,5151	0,5829	0,6361	0,6749	0,5816	0,4820	0,5764	0,7866	0,6516
60,4	62,6	28.05.12 13:45	0,5156	0,5836	0,6371	0,6758	0,5824	0,4829	0,5773	0,7881	0,6520
60,5	62,7	29.05.12 13:55	0,5156	0,5838	0,6372	0,6760	0,5827	0,4832	0,5772	0,7883	0,6522
60,4	62,2	30.05.12 13:20	0,5155	0,5839	0,6369	0,6757	0,5821	0,4828	0,5770	0,7878	0,6520
60,4	62,7	31.05.12 11:35	0,5156	0,5839	0,6372	0,6759	0,5825	0,4831	0,5774	0,7883	0,6522
70,6	72,6	01.06.12 12:15	0,5226	0,5912	0,6458	0,6844	0,5910	0,4901	0,5843	0,7991	0,6603
70,9	72,9	05.06.12 09:45	0,5225	0,5909	0,6453	0,6837	0,5901	0,4888	0,5836	0,7988	0,6598
70,9	72,9	06.06.12 09:55	0,5226	0,5909	0,6450	0,6831	0,5901	0,4887	0,5839	0,7986	0,6599
71,1	73,1	07.06.12 13:25	0,5233	0,5914	0,6459	0,6844	0,5911	0,4895	0,5845	0,7997	0,6614
71,1	73,1	08.06.12 13:25	0,5234	0,5920	0,6466	0,6850	0,5917	0,4902	0,5856	0,8003	0,6609
71,2	73,1	09.06.12 16:10	0,5229	0,5915	0,6459	0,6844	0,5911	0,4892	0,5847	0,7997	0,6605
71,3	73,3	10.06.12 16:05	0,5230	0,5915	0,6460	0,6848	0,5913	0,4898	0,5853	0,8003	0,6614
71,3	73,3	12.06.12 08:35	0,5229	0,5920	0,6463	0,6850	0,5917	0,4901	0,5856	0,8005	0,6614
71,3	73,3	13.06.12 17:00	0,5232	0,5920	0,6466	0,6854	0,5920	0,4904	0,5858	0,8005	0,6610
80,4	81,5	14.06.12 12:55	0,5315	0,5999	0,6566	0,6952	0,6014	0,4971	0,5931	0,8134	0,6713
80,5	81,4	15.06.12 13:15	0,5318	0,5998	0,6569	0,6958	0,6018	0,4976	0,5942	0,8144	0,6717
80,6	81,7	19.06.12 15:15	0,5325	0,6014	0,6579	0,6967	0,6028	0,4984	0,5954	0,8152	0,6729
81,0	81,9	20.06.12 16:25	0,5326	0,6019	0,6581	0,6971	0,6033	0,4991	0,5955	0,8153	0,6728
81,0	82,0	21.06.12 16:05	0,5325	0,6019	0,6582	0,6971	0,6033	0,4991	0,5955	0,8150	0,6727
80,9	81,9	22.06.12 15:30	0,5323	0,6015	0,6575	0,6959	0,6025	0,4981	0,5951	0,8144	0,6728
81,0	81,9	24.06.12 11:20	0,5321	0,6011	0,6572	0,6958	0,6021	0,4977	0,5949	0,8142	0,6719
81,1	82,1	25.06.12 13:50	0,5322	0,6015	0,6568	0,6958	0,6019	0,4976	0,5944	0,8141	0,6713
81,1	82,0	26.06.12 09:35	0,5322	0,6010	0,6565	0,6962	0,6019	0,4985	0,5948	0,8142	0,6719

rF [%]	rF [%]	Datum Uhrzeit	Masse Gewebe in g abzüglich Masse Gefäß und seiner Feuchte								
Fühler 1	**Fühler 2**		**N2**	**N2-B1**	**N3**	**N3-B1**	**N3-B2**	**N4**	**N4-B1**	**N5**	**N5-B1**
90,1	89,5	27.06.12 09:45	0,5498	0,6196	0,6791	0,7174	0,6232	0,5146	0,6132	0,8426	0,6935
89,7	89,2	28.06.12 13:50	0,5498	0,6198	0,6797	0,7185	0,6239	0,5157	0,6142	0,8421	0,6932
89,6	89,1	29.06.12 12:50	0,5496	0,6197	0,6798	0,7187	0,6240	0,5155	0,6139	0,8418	0,6932
89,8	89,3	30.06.12 12:50	0,5501	0,6202	0,6802	0,7195	0,6247	0,5166	0,6149	0,8424	0,6943
90,2	89,5	03.07.12 08:50	0,5499	0,6203	0,6801	0,7191	0,6245	0,5158	0,6146	0,8421	0,6933
90,1	89,5	04.07.12 08:25	0,5498	0,6203	0,6800	0,7191	0,6244	0,5156	0,6144	0,8424	0,6934
90,2	89,6	06.07.12 09:25	0,5499	0,6204	0,6801	0,7199	0,6249	0,5169	0,6150	0,8424	0,6937
90,5	89,8	11.07.12 08:25	0,5499	0,6206	0,6799	0,7192	0,6245	0,5156	0,6146	0,8422	0,6936
82,4	83,1	12.07.12 08:25	0,5361	0,6074	0,6626	0,7035	0,6089	0,5019	0,6010	0,8212	0,6786
81,6	82,4	13.07.12 08:05	0,5355	0,6064	0,6620	0,7028	0,6083	0,5014	0,6004	0,8202	0,6777
82,2	82,8	17.07.12 08:35	0,5350	0,6062	0,6615	0,7023	0,6079	0,5013	0,5999	0,8198	0,6777
81,7	82,4	18.07.12 08:25	0,5350	0,6051	0,6614	0,7021	0,6076	0,5011	0,5996	0,8192	0,6778
82,0	82,6	20.07.12 08:10	0,5349	0,6061	0,6612	0,7019	0,6074	0,5007	0,5996	0,8195	0,6773
82,1	82,8	21.07.12 14:15	0,5348	0,6051	0,6608	0,7015	0,6070	0,5004	0,5992	0,8190	0,6767
72,7	74,3	22.07.12 15:25	0,5265	0,5967	0,6507	0,6913	0,5969	0,4932	0,5906	0,8062	0,6671
73,2	74,9	23.07.12 15:25	0,5263	0,5967	0,6502	0,6905	0,5962	0,4927	0,5897	0,8058	0,6666
73,0	74,6	26.07.12 09:10	0,5268	0,5972	0,6514	0,6919	0,5975	0,4944	0,5911	0,8065	0,6674
73,0	74,6	27.07.12 09:25	0,5265	0,5972	0,6515	0,6921	0,5975	0,4943	0,5911	0,8064	0,6673
73,0	74,6	28.07.12 12:55	0,5268	0,5974	0,6516	0,6922	0,5977	0,4945	0,5912	0,8066	0,6675
73,0	74,6	29.07.12 12:55	0,5267	0,5973	0,6513	0,6918	0,5976	0,4943	0,5911	0,8065	0,6674
63,3	65,3	30.07.12 11:30	0,5196	0,5894	0,6421	0,6828	0,5881	0,4875	0,5829	0,7955	0,6583
63,1	65,1	31.07.12 09:30	0,5193	0,5891	0,6423	0,6826	0,5881	0,4870	0,5832	0,7952	0,6582
63,0	65,0	01.08.12 08:40	0,5196	0,5894	0,6423	0,6828	0,5884	0,4875	0,5833	0,7954	0,6584
62,4	64,6	09.08.12 09:10	0,5189	0,5886	0,6414	0,6818	0,5873	0,4864	0,5822	0,7941	0,6575
93,5	91,2	10.08.12 08:35	0,5668	0,6354	0,6994	0,7369	0,6409	0,5299	0,6296	0,8677	0,7122
93,7	91,4	11.08.12 10:15	0,5670	0,6364	0,7003	0,7375	0,6419	0,5308	0,6304	0,8691	0,7127
93,9	91,5	12.08.12 09:20	0,5659	0,6368	0,7000	0,7372	0,6415	0,5304	0,6305	0,8641	0,7129
93,9	91,7	15.08.12 09:30	0,5671	0,6371	0,7005	0,7380	0,6423	0,5303	0,6310	0,8696	0,7133
94,3	91,9	16.08.12 10:40	0,5671	0,6371	0,7000	0,7382	0,6423	0,5315	0,6311	0,8697	0,7133
52,5	54,5	26.08.12 13:40	0,5135	0,5833	0,6352	0,6753	0,5811	0,4820	0,5769	0,7862	0,6513
52,3	54,4	27.08.12 13:35	0,5133	0,5829	0,6346	0,6747	0,5805	0,4817	0,5766	0,7857	0,6509
52,2	54,4	28.08.12 17:05	0,5133	0,5827	0,6346	0,6748	0,5805	0,4816	0,5766	0,7856	0,6507
52,1	54,3	31.08.12 13:40	0,5132	0,5829	0,6350	0,6753	0,5810	0,4821	0,5769	0,7856	0,6510
41,7	43,7	05.09.12 14:15	0,5082	0,5773	0,6289	0,6691	0,5748	0,4775	0,5714	0,7779	0,6448
41,3	43,3	06.08.12 17:35	0,5073	0,5761	0,6273	0,6673	0,5732	0,4759	0,5703	0,7766	0,6436
41,3	43,4	07.09.12 17:10	0,5072	0,5762	0,6273	0,6674	0,5733	0,4760	0,5703	0,7764	0,6435
41,8	43,4	08.09.12 17:40	0,5077	0,5770	0,6282	0,6684	0,5742	0,4768	0,5710	0,7772	0,6443
41,6	43,6	10.09.12 17:00	0,5076	0,5769	0,6282	0,6684	0,5742	0,4770	0,5710	0,7772	0,6443
41,6	43,5	11.09.12 17:45	0,5080	0,5775	0,6288	0,6689	0,5748	0,4772	0,5719	0,7777	0,6448
31,0	32,2	21.09.12 18:40	0,5018	0,5709	0,6211	0,6613	0,5671	0,4714	0,5649	0,7684	0,6373
30,6	32,1	22.09.12 17:15	0,5016	0,5707	0,6208	0,6609	0,5669	0,4712	0,5647	0,7684	0,6372
30,8	32,4	24.09.12 09:05	0,5015	0,5705	0,6208	0,6609	0,5668	0,4712	0,5647	0,7680	0,6369

Berechnung der Trockenmasse als Bezugsgröße für die Berechnung der Feuchtezuschläge

Sorptionsisotherme HfBK Klimaschrank 25 °C
Berechnung Feuchtezuschlag *u* bei 25 °C / 30 %rF

$m_{25/30}$ Masse im Gleichgewicht bei 25 °C / 30 %r
m_{tr} Masse nach Trocknung bei 105 °C
$u_{25/30} = (m_{25/30} - m_{tr})/m_{tr}$

Probenname	$m_{25/30}$ [g]	m_{tr} [g]	$u_{25/30}$ [%]
N2	0,4996	0,4759	4,98
N2-B1	0,5665	0,5457	3,81
N3	0,6175	0,5896	4,73
N3-B1	0,6579	0,6312	4,23
N3-B2	0,6535	0,6273	4,18
N4	0,4684	0,4476	4,65
N4-B1	0,5618	0,5395	4,13
N5	0,7623	0,7265	4,93
N5-B1	0,6332	0,6079	4,16
N1	1,1119	1,0587	5,03
N1-A-K4-u	1,1256	1,0729	4,91
N1-A-K4-g	1,1842	1,1283	4,95
N1-A-K10-u	1,1358	1,0837	4,81
N1-A-K10-g	1,1003	1,0510	4,69
N1-A-TL	1,1636	1,1083	4,99
N1-A-X84	0,8444	0,8057	4,80
N1-A-X168	0,9428	0,8971	5,09
N1-A-TL-K4-u	1,2467	1,1900	4,76
N1-A-X84-K4-u	0,9212	0,8787	4,84
N1-A-X168-K4-u	0,8426	0,8048	4,70
N1-A-T105-u	0,9380	0,8958	4,71

Sorptionsisothermen statische Methode im Klimaschrank 25 °C

Berechnung Masse trocken m_{tr}

für die Berechnung von u

$$m_{tr} = m_{25/30} - u_{25/30}$$

m_{tr} Masse trocken

$u_{25/30}$ Feuchtezuschlag u bei 25 °C / 30 %rF; Daten experimentell ermittelt

$m_{25/30}$ Masse in g bei 25 °C / 30 %rF; Daten aus Sorptionsisotherme

	Berechnung Masse trocken m_{tr}											
	N1	**N1-A-K4-u**	**N1-A-K4-g**	**N1-A-K10-u**	**N1-A-K10-g**	**N1-A-TL**	**N1-A-X84**	**N1-A-X168**	**N1-A-TL-K4-u**	**N1-A-X84-K4-u**	**N1-A-X168-K4-u**	**N1-A-T105-u**
$m_{25/30}$ [g]	1,1167	1,1295	1,1877	1,1389	1,1033	1,1686	0,8480	0,9481	1,2491	0,9233	0,8453	0,9421
$u_{25/30}$ [%]	5,03	4,91	4,95	4,81	4,69	4,99	4,80	5,09	4,76	4,84	4,70	4,71
m_{tr} [g]	1,0605	1,0740	1,1289	1,0841	1,0515	1,1102	0,8072	0,8998	1,1896	0,8786	0,8055	0,8977

Berechnung Feuchtezuschlag u $u = (m_f - m_{tr})/m_{tr}$

m_f Masse feucht; Daten aus Sorptionsisotherme

m_{tr} Masse trocken

rF [%]	Berechnung Feuchtezuschlag u											
	N1	**N1-A-K4-u**	**N1-A-K4-g**	**N1-A-K10-u**	**N1-A-K10-g**	**N1-A-TL**	**N1-A-X84**	**N1-A-X168**	**N1-A-TL-K4-u**	**N1-A-X84-K4-u**	**N1-A-X168-K4-u**	**N1-A-K105-u**
40	6,10%	5,92%	5,99%	5,77%	5,63%	6,02%	5,79%	6,11%	5,71%	5,80%	5,68%	5,67%
50	7,04%	6,82%	6,92%	6,61%	6,52%	6,94%	6,80%	7,09%	6,61%	6,74%	6,63%	6,59%
60	8,00%	7,56%	7,81%	7,32%	7,34%	7,75%	7,48%	7,83%	7,31%	7,41%	7,62%	7,44%
70	9,58%	8,81%	9,33%	8,46%	8,75%	9,08%	8,85%	9,21%	8,42%	8,64%	9,08%	8,83%
80	11,51%	10,30%	11,15%	9,79%	10,49%	10,97%	10,82%	11,19%	9,78%	10,18%	10,80%	10,83%
90	15,07%	13,69%	14,47%	13,21%	13,60%	14,83%	14,43%	14,86%	13,34%	13,58%	13,88%	14,41%
95	18,35%	17,22%	17,44%	16,62%	16,24%	18,33%	17,50%	18,13%	16,90%	16,83%	16,71%	17,83%
80	12,07%	11,13%	11,63%	10,80%	10,90%	11,81%	11,40%	11,83%	10,87%	10,98%	11,23%	11,64%
70	10,44%	9,78%	10,12%	9,51%	9,54%	10,21%	10,02%	10,32%	9,59%	9,71%	9,79%	10,02%
60	8,95%	8,49%	8,72%	8,29%	8,22%	8,76%	8,50%	8,82%	8,30%	8,35%	8,44%	8,61%
50	7,66%	7,43%	7,49%	7,32%	7,10%	7,52%	7,28%	7,55%	7,29%	7,31%	7,25%	7,37%
40	6,47%	6,30%	6,35%	6,23%	5,99%	6,35%	6,10%	6,38%	6,21%	6,17%	6,17%	6,22%
30	5,38%	5,30%	5,33%	5,25%	5,01%	5,30%	5,08%	5,35%	5,22%	5,21%	5,11%	5,07%

Differenz im Feuchtezuschlag u zwischen neuen und gealterten Geweben

rF [%]	Feuchtezuschlag Gealtertes Gewebe – Feuchtezuschlag N1										
	N1-A-K4-u	N1-A-K4-g	N1-A-K10-u	N1-A-K10-g	N1-A-TL	N1-A-X84	N1-A-X168	N1-A-TL-K4-u	N1-A-X84-K4-u	N1-A-X168-K4-u	N1-A-K105-u
40	-0,18%	-0,11%	-0,33%	-0,47%	-0,08%	-0,31%	0,01%	-0,39%	-0,31%	-0,42%	-0,43%
50	-0,22%	-0,12%	-0,43%	-0,52%	-0,10%	-0,24%	0,04%	-0,43%	-0,30%	-0,41%	-0,45%
60	-0,43%	-0,19%	-0,67%	-0,65%	-0,25%	-0,51%	-0,16%	-0,68%	-0,59%	-0,37%	-0,56%
70	-0,76%	-0,25%	-1,12%	-0,82%	-0,50%	-0,73%	-0,37%	-1,16%	-0,94%	-0,50%	-0,75%
80	-1,21%	-0,36%	-1,72%	-1,02%	-0,54%	-0,68%	-0,31%	-1,73%	-1,33%	-0,71%	-0,68%
90	-1,38%	-0,60%	-1,87%	-1,47%	-0,24%	-0,64%	-0,21%	-1,73%	-1,50%	-1,19%	-0,66%
95	-1,14%	-0,91%	-1,74%	-2,11%	-0,02%	-0,85%	-0,22%	-1,45%	-1,52%	-1,65%	-0,53%
80	-0,94%	-0,45%	-1,27%	-1,17%	-0,27%	-0,67%	-0,25%	-1,20%	-1,10%	-0,84%	-0,43%
70	-0,65%	-0,32%	-0,93%	-0,89%	-0,22%	-0,41%	-0,12%	-0,85%	-0,73%	-0,65%	-0,41%
60	-0,46%	-0,23%	-0,66%	-0,73%	-0,19%	-0,45%	-0,13%	-0,65%	-0,60%	-0,51%	-0,34%
50	-0,24%	-0,17%	-0,34%	-0,56%	-0,14%	-0,38%	-0,11%	-0,37%	-0,36%	-0,41%	-0,29%
40	-0,17%	-0,12%	-0,24%	-0,48%	-0,12%	-0,37%	-0,09%	-0,26%	-0,30%	-0,30%	-0,25%
30	-0,08%	-0,05%	-0,13%	-0,37%	-0,08%	-0,30%	-0,03%	-0,16%	-0,17%	-0,28%	-0,32%

Hysterese

rF [%]	Feuchtezuschlag Desorption- Feuchtezuschlag Sorption: Bewertung der Hysterese											
	N1	N1-A-K4-u	N1-A-K4-g	N1-A-K10-u	N1-A-K10-g	N1-A-TL	N1-A-X84	N1-A-X168	N1-A-TL-K4-u	N1-A-X84-K4-u	N1-A-X168-K4-u	N1-A-K105-u
80	0,57%	0,83%	0,48%	1,01%	0,41%	0,84%	0,58%	0,63%	1,09%	0,80%	0,43%	0,81%
70	0,86%	0,97%	0,79%	1,05%	0,79%	1,13%	1,18%	1,11%	1,17%	1,07%	0,71%	1,19%
60	0,95%	0,93%	0,91%	0,96%	0,87%	1,01%	1,02%	0,99%	0,98%	0,94%	0,82%	1,18%
50	0,62%	0,61%	0,58%	0,71%	0,58%	0,58%	0,48%	0,47%	0,68%	0,57%	0,62%	0,78%
40	0,37%	0,38%	0,35%	0,46%	0,36%	0,32%	0,31%	0,27%	0,50%	0,38%	0,48%	0,55%

Sorptionsisotherme statische Methode im Klimaschrank 25 °C

Berechnung Masse trocken m_{tr}

$m_{tr} = m_{25/30} - u_{25/30}$

für die Berechnung von u

m_{tr} Masse trocken

$u_{25/30}$ Feuchtezuschlag u bei 25 °C / 30 %rF; Daten experimentell e

$m_{25/30}$ Masse in g bei 25 °C / 30 %rF; Daten aus Sorptionsisotherme

	Berechnung Masse trocken m_{tr}								
	N2	**N2-B1**	**B3**	**N3-B1**	**N3-B2**	**N4**	**N4-B1**	**N5**	**N5-B1**
$m_{25/30}$ [g]	0,5008	0,5697	0,6202	0,6605	0,5661	0,4706	0,5642	0,7668	0,6362
$u_{25/30}$ [%]	4,9800	3,8100	4,7300	4,2300	4,1800	4,6500	4,1300	4,9300	4,1600
m_{tr} [g]	0,4759	0,5479	0,5908	0,6325	0,5424	0,4487	0,5409	0,7290	0,6098

Berechnung Feuchtezuschlag u $u = (m_f - m_{tr})/m_{tr}$

m_f Masse feucht; Daten aus Sorptionsisotherme

m_{tr} Masse trocken

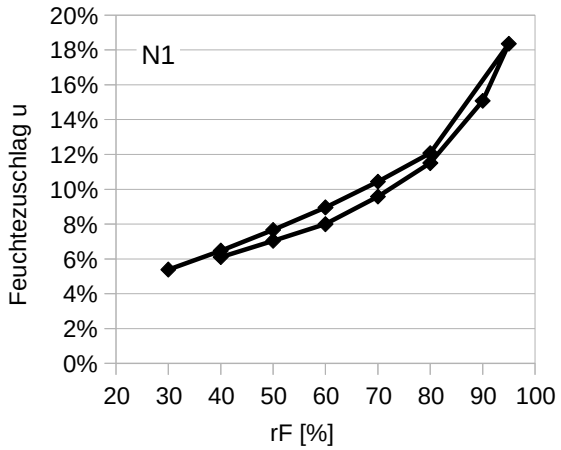
rF [%]	Berechnung Feuchtezuschlag u								
	N2	**N2-B1**	**N3**	**N3-B1**	**N3-B2**	**N4**	**N4-B1**	**N5**	**N5-B1**
40	6,11%	4,75%	5,80%	5,18%	5,29%	5,67%	5,08%	5,96%	5,12%
50	7,20%	5,68%	6,83%	6,09%	6,35%	6,77%	5,97%	7,06%	6,08%
60	8,34%	6,56%	7,85%	6,86%	7,40%	7,67%	6,76%	8,13%	6,96%
70	9,93%	8,03%	9,43%	8,35%	9,14%	9,29%	8,30%	9,79%	8,45%
80	11,91%	9,85%	11,39%	10,21%	11,23%	11,24%	10,11%	11,83%	10,34%
90	15,56%	13,27%	15,10%	13,70%	15,22%	14,93%	13,61%	15,55%	13,75%
95	19,16%	16,27%	18,56%	16,71%	18,42%	18,46%	16,69%	19,29%	16,98%
80	12,38%	10,43%	11,85%	10,91%	11,91%	11,53%	10,79%	12,34%	10,97%
70	10,66%	9,00%	10,23%	9,38%	10,17%	10,16%	9,28%	10,62%	9,44%
60	9,03%	7,42%	8,56%	7,79%	8,28%	8,41%	7,65%	8,92%	7,83%
50	7,85%	6,33%	7,40%	6,68%	7,02%	7,33%	6,60%	7,75%	6,70%
40	6,58%	5,16%	6,18%	5,52%	5,70%	6,09%	5,45%	6,50%	5,53%
30	5,37%	4,11%	5,07%	4,50%	4,49%	5,01%	4,40%	5,34%	4,46%

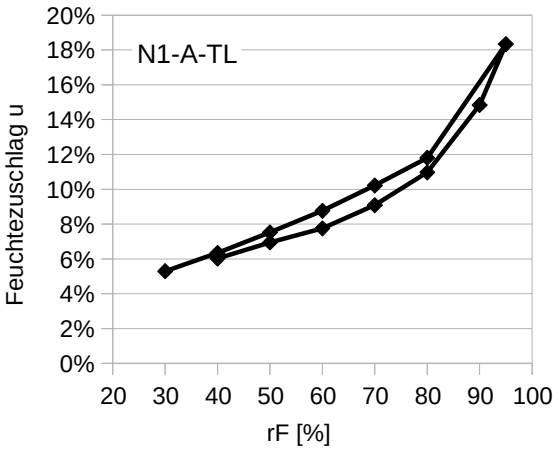
Differenz im Feuchtezuschlag u zwischen gebleichten und nicht gebleichten Geweben

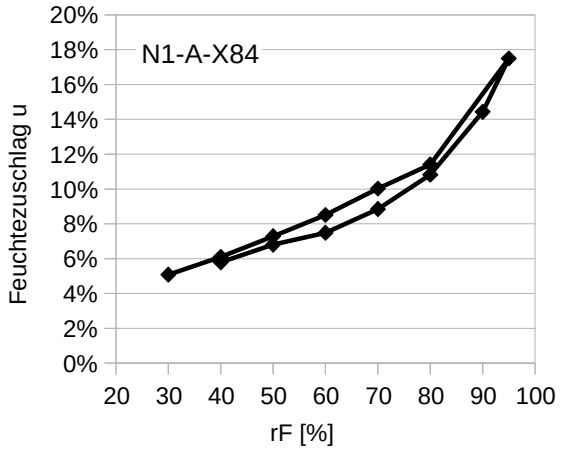
rF [%]	Differenz des Feuchtezuschlags zwischen gebleichten und nicht gebleichten Geweben				
	(N2-B1) - (N2)	(N3-B1) – (N3)	(N3-B2) – (N3)	(N4-B1) – (N4)	(N5-B1) – (N5)
40	-1,36%	-0,62%	-0,51%	-0,59%	-0,84%
50	-1,52%	-0,73%	-0,47%	-0,80%	-0,99%
60	-1,78%	-0,99%	-0,46%	-0,92%	-1,17%
70	-1,90%	-1,08%	-0,30%	-0,99%	-1,35%
80	-2,07%	-1,18%	-0,16%	-1,14%	-1,50%
90	-2,29%	-1,41%	0,12%	-1,32%	-1,81%
95	-2,89%	-1,86%	-0,14%	-1,77%	-2,32%
80	-1,94%	-0,94%	0,07%	-0,74%	-1,36%
70	-1,66%	-0,85%	-0,06%	-0,88%	-1,18%
60	-1,61%	-0,77%	-0,28%	-0,76%	-1,10%
50	-1,51%	-0,72%	-0,38%	-0,73%	-1,05%
40	-1,42%	-0,66%	-0,48%	-0,65%	-0,97%
30	-1,26%	-0,57%	-0,57%	-0,61%	-0,88%

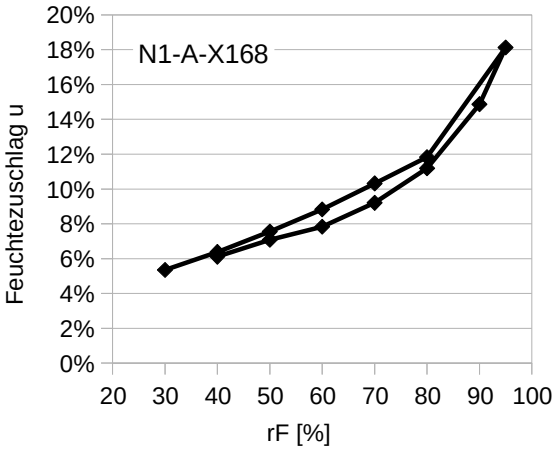
Hysterese

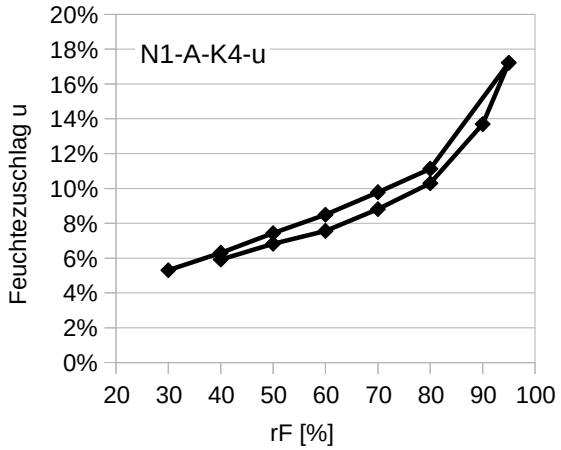
rF [%]	Feuchtezuschlag Desorption- Feuchtezuschlag Sorption: Bewertung der Hysterese								
	N2	N2-B1	N3	N3-B1	N3-B2	N4	N4-B1	N5	N5-B1
80	0,46%	0,58%	0,46%	0,70%	0,68%	0,29%	0,68%	0,51%	0,64%
70	0,74%	0,97%	0,80%	1,03%	1,03%	0,87%	0,98%	0,82%	0,99%
60	0,69%	0,86%	0,71%	0,93%	0,88%	0,74%	0,89%	0,80%	0,87%
50	0,65%	0,66%	0,58%	0,58%	0,66%	0,56%	0,63%	0,69%	0,62%
40	0,46%	0,40%	0,37%	0,33%	0,41%	0,42%	0,37%	0,53%	0,41%

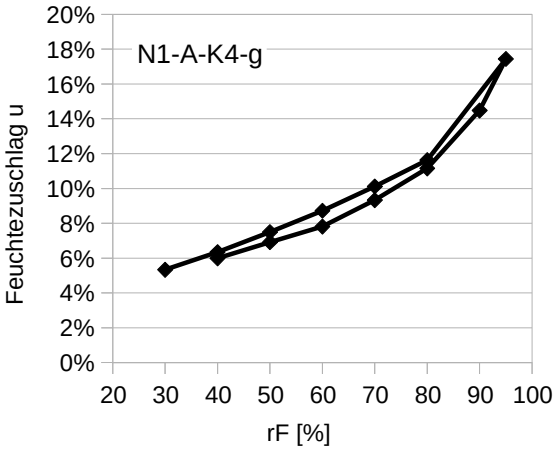

N1
Feuchtezuschlag u
rF [%]

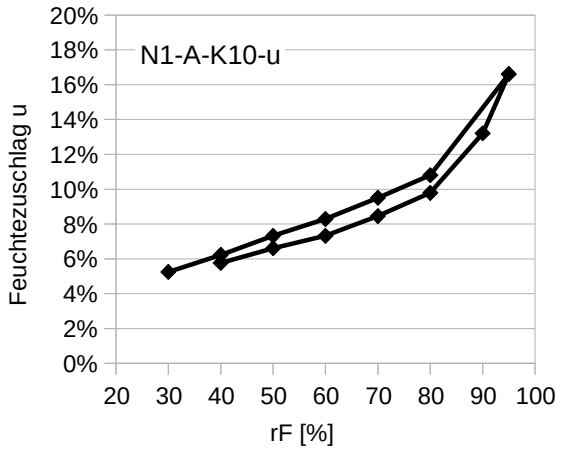

N1-A-TL
Feuchtezuschlag u
rF [%]

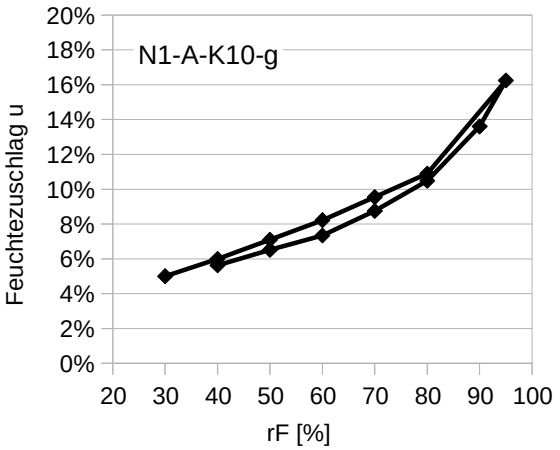

N1-A-X84
Feuchtezuschlag u
rF [%]

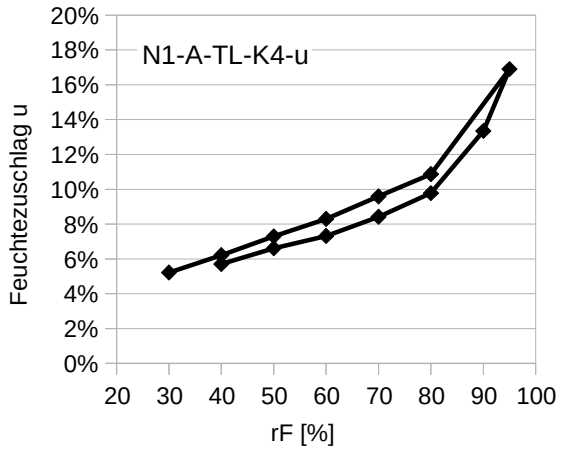

N1-A-X168
Feuchtezuschlag u
rF [%]

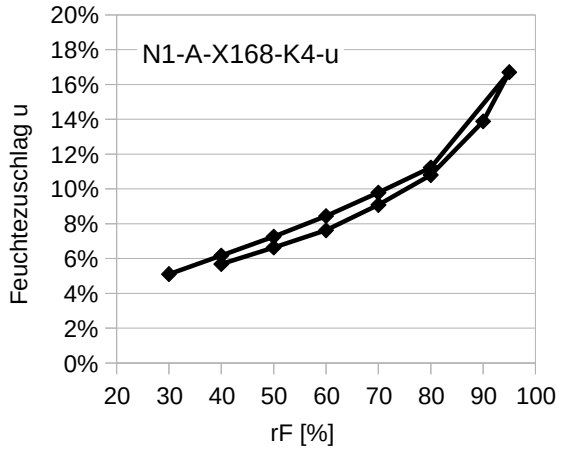

N1-A-K4-u
Feuchtezuschlag u
rF [%]

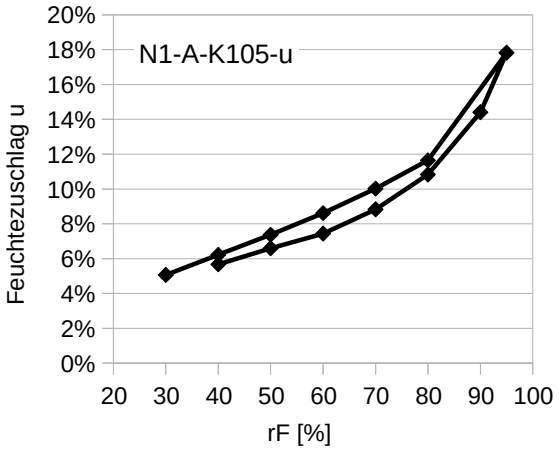

N1-A-K4-g
Feuchtezuschlag u
rF [%]

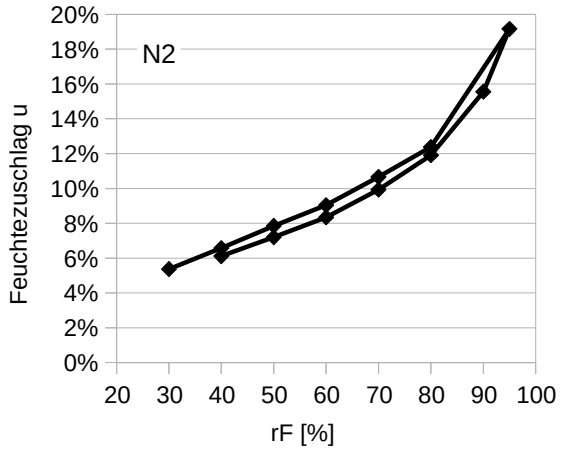

N1-A-K10-u
Feuchtezuschlag u
rF [%]

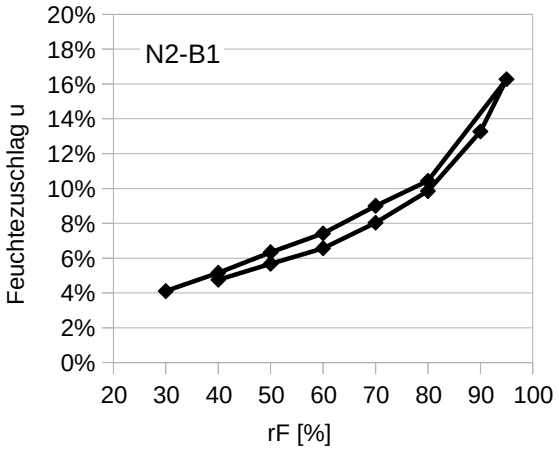

N1-A-K10-g
Feuchtezuschlag u
rF [%]

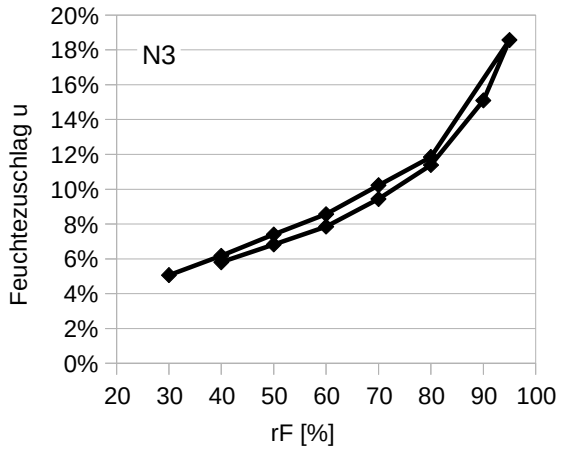

N1-A-TL-K4-u
Feuchtezuschlag u
rF [%]

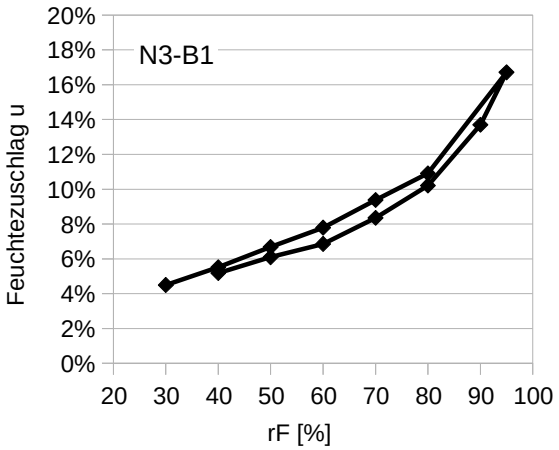

N1-A-X168-K4-u
Feuchtezuschlag u
rF [%]

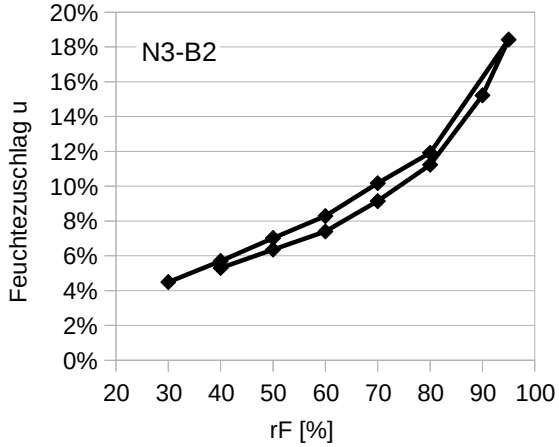

N1-A-K105-u
Feuchtezuschlag u
rF [%]

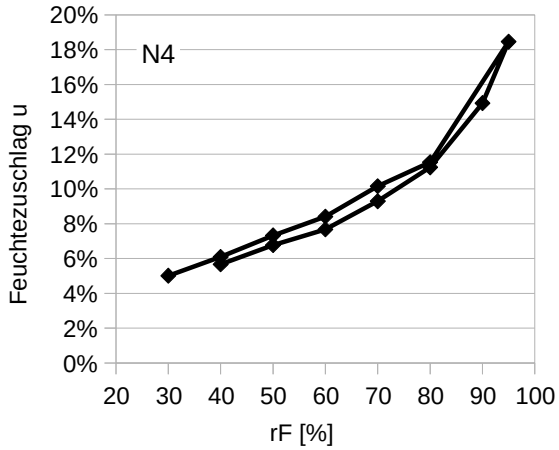

N2
Feuchtezuschlag u
rF [%]

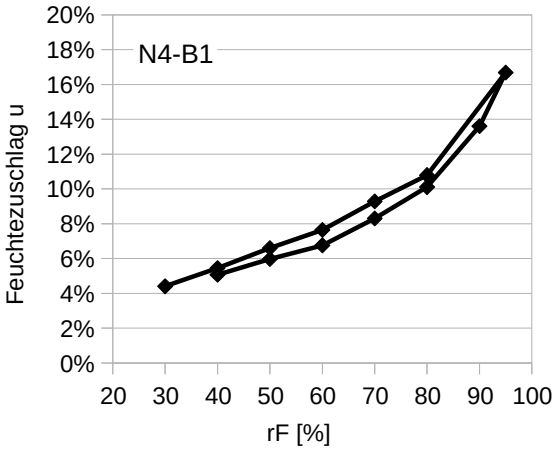

N2-B1
Feuchtezuschlag u
rF [%]

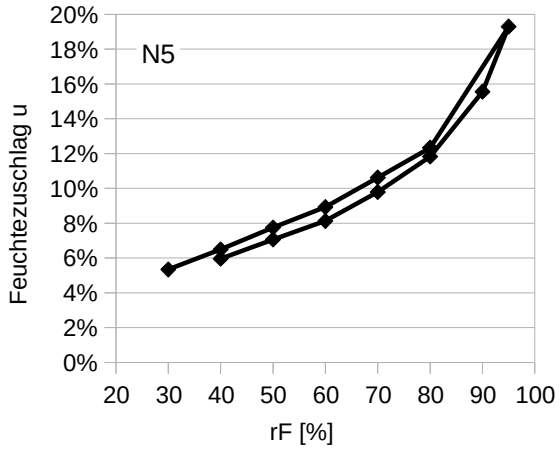

N3
Feuchtezuschlag u
rF [%]

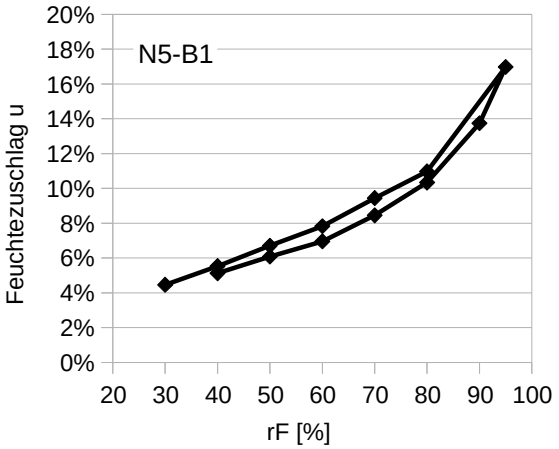

N3-B1
Feuchtezuschlag u
rF [%]


N3-B2
Feuchtezuschlag u
20%
18%
16%
14%
12%
10%
8%
6%
4%
2%
0%
20 30 40 50 60 70 80 90 100
rF [%]


N4
Feuchtezuschlag u
20%
18%
16%
14%
12%
10%
8%
6%
4%
2%
0%
20 30 40 50 60 70 80 90 100
rF [%]


N4-B1
Feuchtezuschlag u
20%
18%
16%
14%
12%
10%
8%
6%
4%
2%
0%
20 30 40 50 60 70 80 90 100
rF [%]


N5
Feuchtezuschlag u
20%
18%
16%
14%
12%
10%
8%
6%
4%
2%
0%
20 30 40 50 60 70 80 90 100
rF [%]


N5-B1
Feuchtezuschlag u
20%
18%
16%
14%
12%
10%
8%
6%
4%
2%
0%
20 30 40 50 60 70 80 90 100
rF [%]

B.7.2 Dynamische Methode

Tabelle B.10: Messergebnisse und daraus errechneter Feuchtezuschlag der Sorptionsisotherme DVS 25 °C.

	H-19-T2 (K) Messung 1		H-19-T2 (K) Messung 2		Mittelwert
Relative Feuchte [%]	**Masse [mg]**	**Feuchte-zuschlag [%]**	**Masse [mg]**	**Feuchte-zuschlag [%]**	**Feuchte-zuschlag [%]**
30	2,01429	4,25	2,14156	4,40	4,33
40	2,02933	5,03	2,15723	5,17	5,10
50	2,04297	5,74	2,17160	5,87	5,80
60	2,05625	6,42	2,18521	6,53	6,48
70	2,07571	7,43	2,20476	7,49	7,46
80	2,10680	9,04	2,23605	9,01	9,02
90	2,17674	12,66	2,30876	12,56	12,61
95	2,24914	16,41	2,38394	16,22	16,31
80	2,14657	11,10	2,27751	11,03	11,06
70	2,11000	9,20	2,23900	9,15	9,18
60	2,08333	7,82	2,21061	7,77	7,80
50	2,06039	6,64	2,18659	6,60	6,62
40	2,03954	5,56	2,16460	5,53	5,54
30	2,01877	4,48	2,14314	4,48	4,48
20	1,99704	3,36	2,11990	3,35	3,35
10	1,97065	1,99	2,09222	2,00	2,00
0	1,93215	0	2,05122	0	0

Tabelle B.11: Messergebnisse und daraus errechneter Feuchtezuschlag der Sorptionsisotherme DVS 25 °C.

	N1 (K) Messung 1		N1 (K) Messung 2		Mittelwert	N1-A-X168-K4-u (K) Messung 1		N1-A-X168-K4-u (K) Messung 2		Mittelwert
Relative Feuchte [%]	**Masse [mg]**	**Feuchte-zuschlag [%]**	**Masse [mg]**	**Feuchte-zuschlag [%]**	**Feuchtezuschlag [%]**	**Masse [mg]**	**Feuchte-zuschlag [%]**	**Masse [mg]**	**Feuchte-zuschlag [%]**	**Feuchte-zuschlag [%]**
30	2,03622	3,62	2,13717	4,26	3,94	2,15393	3,75	2,14531	3,79	3,77
40	2,04912	4,28	2,15168	4,96	4,62	2,16520	4,29	2,15560	4,29	4,29
50	2,06391	5,03	2,16506	5,62	5,32	2,17790	4,90	2,17184	5,08	4,99
60	2,08020	5,86	2,18060	6,37	6,12	2,19225	5,59	2,19054	5,98	5,79
70	2,10287	7,02	2,20101	7,37	7,19	2,21112	6,50	2,21268	7,05	6,78
80	2,13780	8,79	2,23438	9,00	8,90	2,23690	7,74	2,24194	8,47	8,10
90	2,21171	12,55	2,30924	12,65	12,60	2,29197	10,39	2,29008	10,80	10,59
95	2,28334	16,20	2,38480	16,34	16,27	2,36306	13,82	2,34924	13,66	13,74
90						2,32721	12,09	2,31438	11,97	12,03
80	2,17892	10,89	2,27448	10,95	10,92	2,27439	9,55	2,26256	9,46	9,51
70	2,14117	8,96	2,23526	9,04	9,00	2,24126	7,95	2,23035	7,91	7,93
60	2,11331	7,55	2,20650	7,64	7,59	2,21737	6,80	2,20611	6,73	6,77
50	2,09021	6,37	2,18210	6,45	6,41	2,19652	5,80	2,18551	5,74	5,77
40	2,06937	5,31	2,15997	5,37	5,34	2,17717	4,86	2,16681	4,83	4,85
30	2,04939	4,29	2,13876	4,33	4,31	2,15855	3,97	2,14837	3,94	3,95
20	2,02813	3,21	2,11645	3,24	3,23	2,13853	3,00	2,12795	2,95	2,98
10	2,00267	1,92	2,08979	1,94	1,93	2,11390	1,82	2,10414	1,80	1,81
0	1,96502	0,00	2,04994	0,00	0,00	2,07617	0,00	2,06694	0,00	0,00

Tabelle B.12: Messergebnisse und daraus errechneter Feuchtezuschlag der Sorptionsisotherme DVS 25 °C.

	H-16/17-M (K) Messung 1		H-16/17-M (K) Messung 2		Mittelwert	H-18-E1 (K) Messung 1		H-18-E1 (K) Messung 2		Mittelwert
Relative Feuchte [%]	Masse [mg]	Feuchte-zuschlag [%]	Masse [mg]	Feuchte-zuschlag [%]	Feuchtezuschlag [%]	Masse [mg]	Feuchte-zuschlag [%]	Masse [mg]	Feuchte-zuschlag [%]	Feuchte-zuschlag [%]
30	2,03387	3,94	1,98794	3,85	3,90	2,04857	3,85	2,45848	3,73	3,79
40	2,04334	4,43	1,99779	4,36	4,39	2,06132	4,50	2,47102	4,26	4,38
50	2,05269	4,90	2,00799	4,90	4,90	2,07267	5,07	2,48653	4,91	4,99
60	2,06717	5,64	2,02235	5,65	5,65	2,08491	5,69	2,50335	5,62	5,66
70	2,09427	7,03	2,04940	7,06	7,04	2,10427	6,67	2,52699	6,62	6,65
80	2,13445	9,08	2,08852	9,10	9,09	2,13579	8,27	2,56432	8,20	8,23
90	2,19816	12,34	2,15087	12,36	12,35	2,19471	11,26	2,63261	11,08	11,17
95	2,25698	15,34	2,20920	15,41	15,38	2,24861	13,99	2,69543	13,73	13,86
90	2,22216	13,56	2,17330	13,53	13,55	2,21740	12,41	2,65885	12,19	12,30
80	2,16745	10,77	2,11871	10,68	10,72	2,16766	9,89	2,60026	9,71	9,80
70	2,13102	8,91	2,08348	8,84	8,87	2,13456	8,21	2,56136	8,07	8,14
60	2,10377	7,51	2,05679	7,45	7,48	2,10943	6,94	2,53196	6,83	6,88
50	2,08030	6,31	2,03438	6,28	6,30	2,08815	5,86	2,50744	5,80	5,83
40	2,06033	5,29	2,01473	5,25	5,27	2,06917	4,89	2,48472	4,84	4,87
30	2,04022	4,27	1,99505	4,22	4,24	2,05102	3,97	2,46295	3,92	3,95
20	2,01889	3,18	1,97452	3,15	3,16	2,03113	2,97	2,43969	2,94	2,95
10	1,99361	1,88	1,95015	1,88	1,88	2,00824	1,81	2,41220	1,78	1,79
0	1,95675	0,00	1,91423	0,00	0,00	1,97261	0,00	2,37005	0,00	0,00

Tabelle B.13: Messergebnisse und daraus errechneter Feuchtezuschlag der Sorptionsisotherme DVS 25 °C.

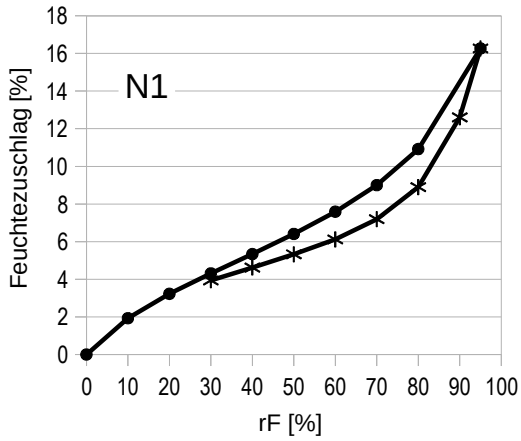
	H-19-M (K) Messung 1		H-19-M (K) Messung 2		Mittelwert	H-19-T1 (S) Messung 1		H-19-T1 (S) Messung 2		Mittelwert
Relative Feuchte [%]	Masse [mg]	Feuchte-zuschlag [%]	Masse [mg]	Feuchte-zuschlag [%]	Feuchtezuschlag [%]	Masse [mg]	Feuchte-zuschlag [%]	Masse [mg]	Feuchte-zuschlag [%]	Feuchte-zuschlag [%]
30	2,16270	4,13	2,30653	4,13	4,13	2,18396	4,45	2,07535	4,22	4,33
40	2,17729	4,83	2,31827	4,66	4,75	2,19930	5,18	2,09010	4,96	5,07
50	2,19083	5,48	2,33131	5,25	5,37	2,21285	5,83	2,10336	5,62	5,73
60	2,20292	6,07	2,35166	6,17	6,12	2,22676	6,50	2,11578	6,25	6,37
70	2,22069	6,92	2,37450	7,20	7,06	2,24538	7,39	2,13279	7,10	7,24
80	2,25617	8,63	2,41478	9,02	8,82	2,28167	9,12	2,16708	8,82	8,97
90	2,32340	11,87	2,49358	12,58	12,22	2,35998	12,87	2,23899	12,43	12,65
95	2,38442	14,80	2,57054	16,05	15,43	2,43076	16,25	2,30614	15,81	16,03
90	2,34669	12,99	2,51715	13,64	13,31			2,26438	13,71	
80	2,29111	10,31	2,45057	10,63	10,47	2,32441	11,17	2,20533	10,74	10,96
70	2,25516	8,58	2,40940	8,78	8,68	2,28488	9,28	2,16835	8,89	9,08
60	2,22805	7,28	2,37859	7,38	7,33	2,25542	7,87	2,14141	7,53	7,70
50	2,20485	6,16	2,35324	6,24	6,20	2,23039	6,67	2,11921	6,42	6,55
40	2,18419	5,16	2,33005	5,19	5,18	2,20772	5,59	2,09821	5,37	5,48
30	2,16371	4,18	2,30784	4,19	4,18	2,18614	4,55	2,07816	4,36	4,46
20	2,14205	3,14	2,28447	3,14	3,14	2,16233	3,42	2,05716	3,30	3,36
10	2,11575	1,87	2,25664	1,88	1,87	2,13385	2,05	2,03058	1,97	2,01
0	2,07693	0,00	2,21502	0,00	0,00	2,09091	0,00	1,99137	0,00	0,00

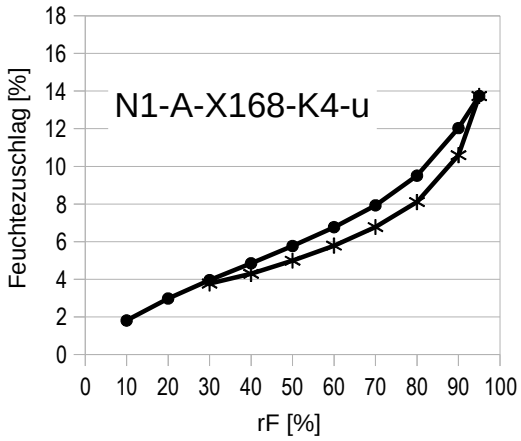
Tabelle B.14: Messergebnisse und daraus errechneter Feuchtezuschlag der Sorptionsisotherme DVS 25 °C.

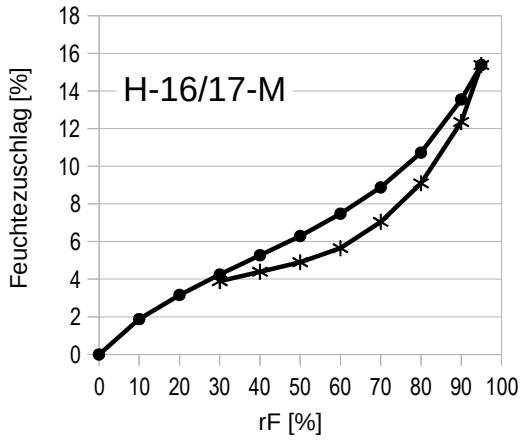
	H-20-H1 (R1) Messung 1		H-20-H1 (R1) Messung 2		Mittelwert	H-20-H2 (R1) Messung 1		H-20-H2 (R1) Messung 2		Mittelwert
Relative Feuchte [%]	Masse [mg]	Feuchte-zuschlag [%]	Masse [mg]	Feuchte-zuschlag [%]	Feuchtezuschlag [%]	Masse [mg]	Feuchte-zuschlag [%]	Masse [mg]	Feuchte-zuschlag [%]	Feuchte-zuschlag [%]
30	1,97399	4,07	2,18286	4,32	4,20	2,68196	4,22	2,54584	3,90	4,06
40	1,98568	4,69	2,19703	5,00	4,84	2,69765	4,83	2,56333	4,61	4,72
50	1,99739	5,31	2,21040	5,64	5,47	2,71077	5,34	2,57855	5,23	5,28
60	2,01366	6,17	2,22808	6,48	6,32	2,72948	6,06	2,59423	5,87	5,97
70	2,03262	7,17	2,25022	7,54	7,35	2,75410	7,02	2,61869	6,87	6,94
80	2,06578	8,91	2,28963	9,42	9,17	2,79429	8,58	2,65841	8,49	8,54
90	2,13485	12,56	2,36994	13,26	12,91	2,87532	11,73	2,73482	11,61	11,67
95	2,20365	16,18	2,45106	17,14	16,66	2,95360	14,77	2,80559	14,50	14,63
90	2,15660	13,70	2,39567	14,49	14,10	2,91105	13,12	2,76622	12,89	13,00
80	2,09720	10,57	2,32617	11,17	10,87	2,84084	10,39	2,70114	10,24	10,31
70	2,06059	8,64	2,28382	9,15	8,89	2,79365	8,56	2,65701	8,43	8,49
60	2,03456	7,27	2,25367	7,70	7,49	2,75907	7,21	2,62507	7,13	7,17
50	2,01325	6,14	2,22876	6,51	6,33	2,73031	6,09	2,59760	6,01	6,05
40	1,99369	5,11	2,20569	5,41	5,26	2,70426	5,08	2,57312	5,01	5,05
30	1,97466	4,11	2,18415	4,38	4,25	2,67887	4,10	2,54882	4,02	4,06
20	1,95542	3,10	2,16073	3,26	3,18	2,65211	3,06	2,52381	3,00	3,03
10	1,93184	1,85	2,13354	1,96	1,91	2,62054	1,83	2,49387	1,78	1,80
0	1,89670	0,00	2,09246	0,00	0,00	2,57346	0,00	2,45035	0,00	0,00

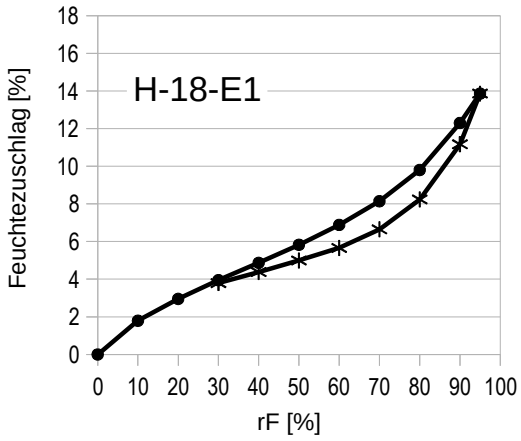
Darstellung der Sorptionsisothermen aus den gemittelten Feuchtezuschlägen aus zwei Bestimmungen

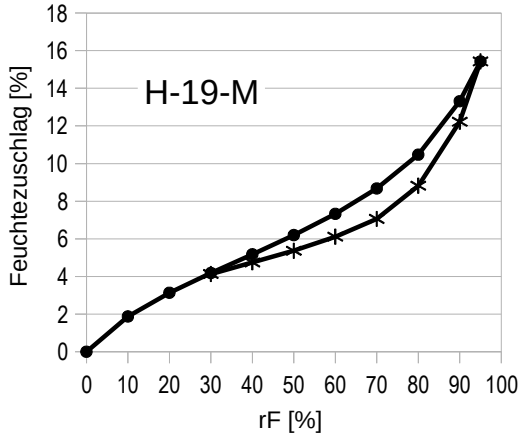
Legende: Sternchen=Sorption, Punkt=Desorption

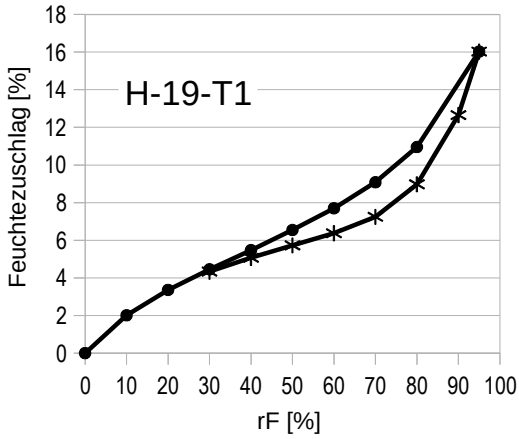


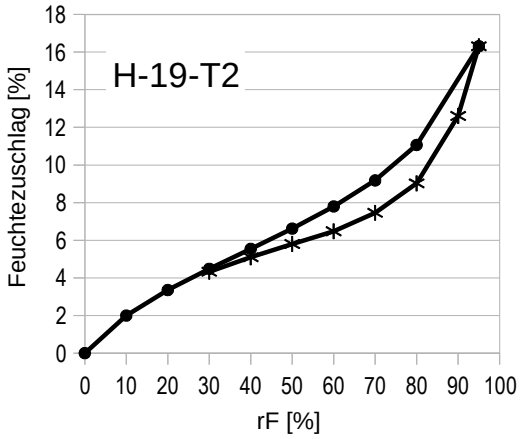


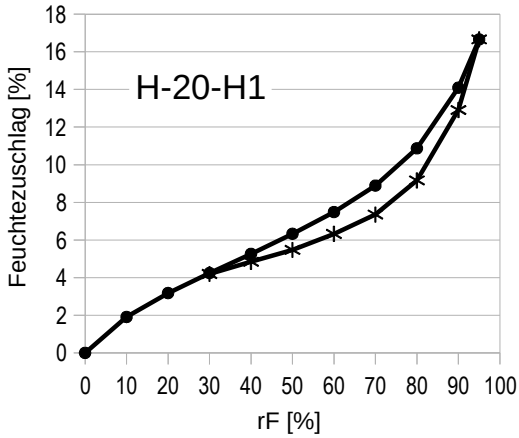


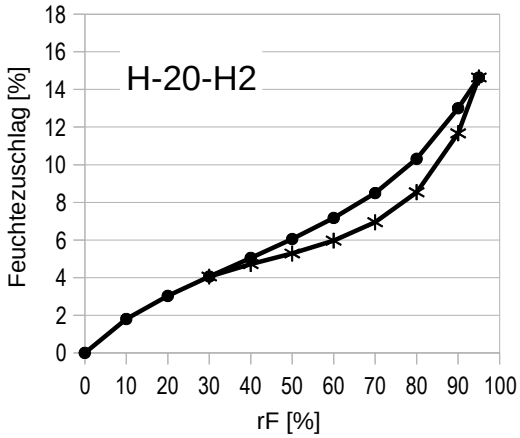





H-19-T1
Feuchtezuschlag [%]
rF [%]
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100


H-19-T2
Feuchtezuschlag [%]
rF [%]
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100


H-20-H1
Feuchtezuschlag [%]
rF [%]
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100


H-20-H2
Feuchtezuschlag [%]
rF [%]
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18
0 10 20 30 40 50 60 70 80 90 100

B.8 Bestimmung der Gleichgewichtsfeuchte mittels NIR-Spektroskopie

Trocknungszeit variiert bei gleichbleibender Temperatur 24.07.12 18°C/40%rF
29.11.2012

N1-105°C

Probenname	Temperatur	Zeit	Gewicht feucht	Gewicht feucht	Gewicht trocken	Feuchtezuschlag	Mittelwert
	[°C]	[s]	[g]	nach Trocknung [g]	[g]	[%]	Feuchtezuschlag
N1-105°-300s-1	105	300	0,705		0,652	8,129	
N1-105°-300s-2		300	0,721		0,669	7,773	
N1-105°-300s-3		300	0,766		0,711	7,736	
N1-105°-300s-4		300	0,814		0,755	7,815	
N1-105°-300s-5		300	0,752		0,700	7,429	
N1-105°-300s-6		300	0,742		0,691	7,381	
N1-105°-300s-7		300	0,783		0,730	7,260	7,665
N1-105°-300s-8		300	0,668		0,621	7,568	
N1-105°-300s-9		300	0,655		0,607	7,908	
N1-105°-300s-10		300	0,790		0,738	7,046	
N1-105°-300s-11		300	1,001		0,928	7,866	
N1-105°-300s-12		300	0,843		0,782	7,801	
N1-105°-300s-13		300	0,789		0,731	7,934	
					STABW	0,308	
N1-105°-20s-1	105	20	0,781	0,781	0,725	7,665	
N1-105°-20s-2		20	0,750	0,749	0,697	7,521	7,575
N1-105°-20s-3		20	0,853	0,852	0,792	7,539	
N1--105°-40s-1	105	40	0,847	0,839	0,787	6,648	
N1-105°-40s-2		40	0,648	0,643	0,602	6,834	6,862
N1-105°-40s-3		40	0,767	0,763	0,712	7,103	
N1-105°-60s-1	105	60	0,790	0,764	0,734	4,122	
N1-105°-60s-2		60	0,723	0,699	0,672	4,091	4,226
N1-105°-60s-3		60	0,673	0,653	0,625	4,465	
N1-105°-80s-1	105	80	0,693	0,662	0,644	2,849	
N1-105°-80s-2		80	0,836	0,794	0,776	2,256	2,580
N1-105°-80s-3		80	0,792	0,755	0,736	2,635	
N1--105°-100s-1	105	100	0,807	0,759	0,750	1,261	
N1-105°-100s-2		100	0,737	0,690	0,685	0,799	0,937
N1-105°-100s-3		100	0,872	0,816	0,810	0,751	
N1-105°-120s-1	105	120	0,683	0,639	0,634	0,729	
N1-105°-120s-2		120	0,664	0,620	0,617	0,531	0,779
N1-105°-120s-3		120	0,719	0,675	0,668	1,076	
N1-105°-200s-1	105	200	0,829	0,769	0,770	-0,127	
N1-105°-200s-2		200	0,920	0,855	0,855	0,058	0,029
N1-105°-200s-3		200	0,803	0,747	0,746	0,157	

Trocknungstemperatur variiert bei gleichbleibender Trocknungszeit

24.07.12 18°C/40%rF

N1-60s

29.11.2012

Probenname	Temperatur	Zeit	Gewicht feucht	Gewicht feucht	Gewicht trocken	Feuchtezuschlag	Mittelwert
	[°C]	[s]	[g]	nach Trocknung [g]	[g]	[%]	Feuchtezuschlag
N1-105°							
N1-105°-60s-1	105	60	0,803	0,785	0,746	5,252	4,324
N1-105°-60s-2	105		0,851	0,823	0,790	4,123	
N1-105°-60s-3	105		0,797	0,770	0,740	4,018	
N1-105°-60s-4	105		0,802	0,774	0,745	3,906	
F350w-90°							
N1-90°-60s-1	90	60	0,756	0,734	0,702	4,532	4,014
N1-90°-60s-2	90		0,743	0,719	0,690	4,187	
N1--90°-60s-3	90		0,785	0,756	0,729	3,688	
N1-90°-60s-4	90		0,768	0,740	0,713	3,740	
N1-90°-60s-5	90		0,777	0,750	0,722	3,924	
F350w-75°							
N1-75°-60s-1	75	60	0,792	0,766	0,736	4,131	4,164
N1-75°-60s-2	75		0,860	0,834	0,799	4,410	
N1-75°-60s-3	75		0,783	0,756	0,727	3,952	
F350w-60°							
N1-60°-60s-1	60	60	0,703	0,682	0,653	4,449	4,130
N1-60°-60s-2	60		0,845	0,820	0,785	4,480	
N1-60°-60s-3	60		0,875	0,844	0,813	3,851	
N1-60°-60s-4	60		0,782	0,752	0,726	3,535	
N1-60°-60s-5	60		0,679	0,658	0,631	4,335	
F350w-50°							
N1-50°-60s-1	50	60	0,789	0,764	0,733	4,254	4,532
N1-50°-60s-2	50		0,797	0,775	0,740	4,693	
N1-50°-60s-3	50		0,893	0,868	0,829	4,651	

Trocknen bis zur Massekonstanz 18°C/40%rF
N1
300s

Probenname	Temperatur	Zeit	Gewicht feucht	Gewicht feucht	Gewicht trocken	Feuchtezuschlag	Mittelwert
	[°C]	[s]	[g]	nach Trocknung [g]	[g]	[%]	Feuchtezuschlag
N1-50°-300s-1	50	300	0,447	0,426	0,415	2,607	2,627
N1-50°-300s-2			0,461	0,439	0,428	2,527	
N1-50°-300s-3			0,416	0,397	0,386	2,748	
N1-60°-300s-1	60	300	0,405	0,384	0,376	2,082	2,127
N1-60°-300s-2			0,509	0,483	0,473	2,165	
N1--60°-300s-3			0,467	0,443	0,434	2,132	
N1-75°-300s-1	75	300	0,484	0,456	0,450	1,436	1,558
N1-75°-300s-2			0,456	0,429	0,424	1,290	
N1-75°-300s-3			0,410	0,388	0,381	1,888	
N1-75°-300s-4			0,445	0,420	0,413	1,616	
N1-90°-300s-1	90	300	0,419	0,391	0,389	0,470	0,707
N1-90°-300s-2			0,456	0,427	0,424	0,818	
N1-90°-300s-3			0,451	0,426	0,419	1,697	
N1-90°-300s-4			0,445	0,415	0,413	0,407	
N1-90°-300s-5			0,415	0,386	0,385	0,141	

Trocknungszeit variiert bei gleichbleibender Temperatur 23°C/50%rF

N1-105°C

Probenname	Temperatur	Zeit	Gewicht feucht	Gewicht feucht	Gewicht trocken	Feuchtezuschlag	Mittelwert
	[°C]	[s]	[g]	nach Trocknung [g]	[g]	[%]	Feuchtezuschlag
N1-105°-300s-1	105	300	0,738		0,680	8,529	
N1-105°-300s-2		300	0,823		0,764	7,723	
N1-105°-300s-3		300	0,756		0,702	7,692	
N1-105°-300s-4		300	1,024		0,950	7,789	
N1-105°-300s-5		300	1,008		0,933	8,039	
N1-105°-300s-6		300	0,895		0,832	7,572	7,874
N1-105°-300s-7		300	0,869		0,805	7,950	
N1-105°-300s-8		300	0,940		0,873	7,675	
N1-105°-300s-9		300	0,986		0,916	7,642	
N1-105°-300s-10		300	1,106		1,024	8,008	
N1-105°-300s-11		300	0,770		0,713	7,994	
						STABW	0,273
N1-105°-20s-1	105	20	0,887	0,886	0,822	7,752	
N1-105°-20s-2		20	0,882	0,88	0,818	7,629	7,711
N1-105°-20s-3		20	0,871	0,87	0,807	7,750	
N1-105°-40s-1	105	40	0,953	0,944	0,883	6,855	
N1-105°-40s-2		40	0,795	0,783	0,737	6,246	6,572
N1-105°-40s-3		40	0,772	0,763	0,716	6,616	
N1-105°-60s-1	105	60	0,793	0,765	0,735	4,065	
N1-105°-60s-2		60	0,800	0,772	0,742	4,098	4,017
N1-105°-60s-3		60	0,920	0,886	0,853	3,887	
N1-105°-80s-1	105	80	0,786	0,739	0,729	1,423	
N1-105°-80s-2		80	0,846	0,797	0,784	1,626	1,507
N1-105°-80s-3		80	0,775	0,729	0,718	1,471	
N1-105°-100s-1	105	100	0,726	0,672	0,673	-0,150	
N1-105°-100s-2		100	0,980	0,914	0,908	0,609	
N1-105°-100s-3		100	0,997	0,927	0,924	0,300	0,210
N1-105°-100s-4		100	0,956	0,89	0,886	0,427	
N1-105°-100s-5		100	0,808	0,748	0,749	-0,136	
N1-105°-120s-1	105	120	1,011	0,938	0,937	0,085	
N1-105°-120s-2		120	0,914	0,849	0,847	0,202	0,127
N1-105°-120s-3		120	0,943	0,875	0,874	0,095	
N1-105°-200s-1	105	200	0,810	0,754	0,751	0,416	
N1-105°-200s-2		200	0,880	0,814	0,816	-0,217	0,164
N1-105°-200s-3		200	0,853	0,792	0,791	0,160	
N1-105°-200s-4		200	1,025	0,953	0,950	0,296	

Trocknungstemperatur variiert bei gleichbleibender Trocknungszeit N1-60s

23°C/50%rF

Probenname	Temperatur	Zeit	Gewicht feucht	Gewicht feucht	Gewicht trocken	Feuchtezuschlag	Mittelwert
	[°C]	[s]	[g]	nach Trocknung [g]	[g]	[%]	Feuchtezuschlag
N1-105°							
N1-105°-60s-1	105	60	1,061	1,03	0,984	4,722	
N1-105°-60s-2	105		0,711	0,683	0,659	3,626	
N1-105°-60s-3	105		0,747	0,721	0,692	4,119	4,199
N1-105°-60s-4	105		0,734	0,711	0,680	4,494	
N1-105°-60s-5	105		0,759	0,732	0,704	4,037	
N1-90°							
N1-90°-60s-1	90	60	0,750	0,717	0,695	3,128	
N1-90°-60s-2	90		0,675	0,648	0,626	3,559	
N1-90°-60s-3	90		0,655	0,627	0,607	3,263	3,558
N1-90°-60s-4	90		0,630	0,605	0,584	3,593	
N1-90°-60s-5	90		0,773	0,747	0,717	4,246	
N1-75°							
N1-75°-60s-1	75	60	0,866	0,835	0,803	4,012	
N1-75°-60s-2	75		0,854	0,823	0,792	3,958	3,877
N1-75°-60s-3	75		0,819	0,787	0,759	3,659	
N1-60°							
N1-60°-60s-1	60	60	0,885	0,855	0,820	4,217	
N1-60°-60s-2	60		0,862	0,83	0,799	3,869	3,982
N1-60°-60s-3	60		0,806	0,776	0,747	3,859	
N1-50°							
N1-50°-60s-1	50	60	0,722	0,697	0,669	4,139	
N1-50°-60s-2	50		0,754	0,73	0,699	4,440	4,356
N1-50°-60s-3	50		0,733	0,71	0,679	4,489	

Trocknen bis zur Massekonstanz

23°C/50%rF

N1 **300s**

Probenname	Temperatur	Zeit	Gewicht feucht	Gewicht feucht	Gewicht trocken	Feuchtezuschlag	Mittelwert
	[°C]	[s]	[g]	nach Trocknung [g]	[g]	[%]	Feuchtezuschlag
N1-50°-300s-1	50	300	0,737	0,698	0,683	2,166	2,434
N1-50°-300s-2			0,746	0,71	0,692	2,668	
N1-50°-300s-3			0,790	0,748	0,732	2,139	
N1-50°-300s-4			0,823	0,784	0,763	2,762	
N1-60°-300s-1	60	300	0,903	0,849	0,837	1,423	1,799
N1-60°-300s-2			0,879	0,833	0,815	2,229	
N1-60°-300s-3			0,731	0,69	0,678	1,824	
N1-60°-300s-4			0,889	0,838	0,824	1,685	
N1-60°-300s-5			0,947	0,894	0,878	1,837	
N1-75°-300s-1	75	300	0,895	0,839	0,830	1,124	0,949
N1-75°-300s-2			0,825	0,771	0,765	0,813	
N1-75°-300s-3			0,821	0,768	0,761	0,910	
N1-90°-300s-1	90	300	0,809	0,754	0,750	0,540	0,485
N1-90°-300s-2			0,742	0,691	0,688	0,459	
N1-90°-300s-3			0,756	0,704	0,701	0,454	

Trocknungszeit variiert bei gleichbleibender Temperatur 18°C/40%rF

N6-105°C

Probenname	Temperatur	Zeit	Gewicht feucht	Gewicht feucht	Gewicht trocken	Feuchtezuschlag	Mittelwert
	[°C]	[s]	[g]	nach Trocknung [g]	[g]	[%]	Feuchtezuschlag
N6-105°-300s-1	105	300	0,770		0,715	7,692	
N6-105°-300s-2		300	0,695		0,642	8,255	
N6-105°-300s-3		300	0,715		0,661	8,169	
N6-105°-300s4		300	0,591		0,549	7,650	
N6-105°-300s-5		300	0,730		0,675	8,148	
N6-105°-300s-6		300	0,678		0,628	7,962	8,002
N6-105°-300s-7		300	0,724		0,671	7,899	
N6-105°-300s-8		300	0,769		0,712	8,006	
N6-105°-300s-9		300	0,696		0,642	8,411	
N6-105°-300s-10		300	0,683		0,634	7,729	
N6-105°-300s-11		300	0,747		0,691	8,104	
						STABW	0,245
N6-105°-20s-1	105	20	0,743	0,743	0,688	8,002	
N6-105°-20s-2		20	0,686	0,685	0,635	7,845	7,896
N6-105°-20s-3		20	0,666	0,665	0,617	7,840	
N6-105°-40s-1	105	40	0,690	0,681	0,639	6,594	
N6-105°-40s-2		40	0,603	0,593	0,558	6,211	6,285
N6-105°-40s-3		40	0,696	0,683	0,644	5,985	
N6-105°-40s-4		40	0,719	0,708	0,666	6,350	
N6-105°-60s-1	105	60	0,674	0,652	0,624	4,477	
N6-105°-60s-2		60	0,652	0,631	0,604	4,524	4,473
N6-105°-60s-3		60	0,663	0,641	0,614	4,419	
N6-105°-80s-1	105	80	0,704	0,664	0,652	1,866	
N6-105°-80s-2		80	0,755	0,714	0,699	2,137	2,068
N6-105°-80s-3		80	0,726	0,687	0,672	2,201	
N6-105°-100s-1	105	100	0,728	0,679	0,674	0,733	
N6-105°-100s-2		100	0,714	0,666	0,661	0,742	0,762
N6-105°-100s-3		100	0,706	0,659	0,654	0,812	
N6-105°-120s-1	105	120	0,743	0,693	0,688	0,734	
N6-105°-120s-2		120	0,692	0,644	0,641	0,511	0,639
N6-105°-120s-3		120	0,663	0,618	0,614	0,672	
N6-105°-200s-1	105	200	0,621	0,574	0,575	-0,172	
N6-105°-200s-2		200	0,694	0,643	0,643	0,066	0,042
N6-105°-200s-3		200	0,681	0,632	0,631	0,231	

Trocknungszeit variiert bei gleichbleibender Temperatur
N6-105°C

23°C/50%rF

Probenname	Temperatur	Zeit	Gewicht feucht	Gewicht feucht	Gewicht trocken	Feuchtezuschlag	Mittelwert
	[°C]	[s]	[g]	nach Trocknung [g]	[g]	[%]	Feuchtezuschlag
N6-105°-300s-1	105	300	0,698		0,641	8,892	
N6-105°-300s-2		300	0,822		0,759	8,300	
N6-105°-300s-3		300	0,745		0,690	7,971	
N6-105°-300s-4		300	0,791		0,730	8,356	
N6-105°-300s-5		300	0,855		0,788	8,503	
N6-105°-300s-6		300	0,869		0,804	8,085	8,374
N6-105°-300s-7		300	0,822		0,759	8,300	
N6-105°-300s-8		300	0,882		0,816	8,088	
N6-105°-300s-9		300	0,724		0,669	8,221	
N6-105°-300s-10		300	0,770		0,710	8,451	
N6-105°-300s-11		300	0,759		0,698	8,739	
N6-105°-300s-12		300	0,785		0,723	8,575	
						STABW	0,274
N6-105°-20s-1	105	20	0,776	0,776	0,716	8,374	
N6-105°-20s-2		20	0,776	0,774	0,716	8,094	8,198
N6-105°-20s-3		20	0,873	0,871	0,806	8,125	
N6-105°-40s-1	105	40	0,764	0,754	0,705	6,955	
N6-105°-40s-2		40	0,768	0,755	0,709	6,539	6,680
N6-105°-40s-3		40	0,771	0,758	0,711	6,546	
N6-105°-60s-1	105	60	0,817	0,783	0,754	3,863	
N6-105°-60s-2		60	0,712	0,678	0,657	3,198	3,652
N6-105°-60s-3		60	0,797	0,763	0,735	3,750	
N6-105°-60s-4		60	0,781	0,748	0,721	3,794	
N6-105°-80s-1	105	80	0,672	0,631	0,620	1,761	
N6-105°-80s-2		80	0,718	0,670	0,663	1,128	1,413
N6-105°-80s-3		80	0,701	0,653	0,647	0,953	
N6-105°-80s-4		80	0,776	0,729	0,716	1,810	
N6-105°-100s-1	105	100	0,709	0,659	0,654	0,731	
N6-105°-100s-2		100	0,798	0,743	0,736	0,904	0,578
N6-105°-100s-3		100	0,712	0,657	0,657	0,002	
N6-105°-100s-4		100	0,732	0,680	0,675	0,675	
N6-105°-120s-1	105	120	0,702	0,651	0,648	0,500	
N6-105°-120s-2		120	0,666	0,617	0,615	0,400	0,552
N6-105°-120s-3		120	0,811	0,754	0,748	0,757	
N6-105°-160s-1	105	160	0,694	0,640	0,640	-0,059	
N6-105°-160s-2		160	0,659	0,610	0,608	0,315	0,145
N6-105°-160s-3		160	0,767	0,709	0,708	0,178	
N6-105°-200s-1	105	200	0,666	0,614	0,615	-0,088	
N6-105°-200s-2		200	0,709	0,655	0,654	0,119	0,264
N6-105°-200s-3		200	0,772	0,716	0,712	0,512	
N6-105°-200s-4		200	0,648	0,601	0,598	0,513	

Trocknungszeit variiert bei gleichbleibender Temperatur N7-105°C

18°C/40%rF

Probenname	Temperatur	Zeit	Gewicht feucht	Gewicht feucht	Gewicht trocken	Feuchtezuschlag	Mittelwert
	[°C]	[s]	[g]	nach Trocknung [g]	[g]	[%]	Feuchtezuschlag
N7-105°-300s-1	105	300	0,928		0,862	7,657	
N7-105°-300s-2		300	0,629		0,585	7,521	
N7-105°-300s-3		300	0,625		0,583	7,204	
N7-105°-300s-4		300	0,516		0,480	7,500	
N7-105°-300s-5		300	0,475		0,448	6,027	
N7-105°-300s-6		300	0,517		0,485	6,598	7,140
N7-105°-300s-7		300	0,507		0,471	7,643	
N7-105°-300s-8		300	0,618		0,579	6,736	
N7-105°-300s-9		300	0,456		0,426	7,042	
N7-105°-300s-10		300	0,610		0,569	7,206	
N7-105°-300s-11		300	0,566		0,528	7,197	
N7-105°-300s-12		300	0,584		0,544	7,353	
						STABW	0,482
N7-105°-20s-1	105	20	0,640	0,638	0,597	6,805	
N7-105°-20s-2		20	0,673	0,672	0,628	6,981	6,909
N7-105°-20s-3		20	0,532	0,531	0,497	6,939	
N7-105°-40s-1	105	40	0,627	0,613	0,585	4,748	
N7-105°-40s-2		40	0,816	0,795	0,762	4,383	
N7-105°-40s-3		40	0,699	0,679	0,652	4,075	4,526
N7-105°-40s-4		40	0,777	0,758	0,725	4,520	
N7-105°-40s-5		40	0,815	0,798	0,761	4,905	
N7-105°-60s-1	105	60	0,714	0,679	0,666	1,888	
N7-105°-60s-2		60	0,756	0,715	0,706	1,330	
N7-105°-60s-3		60	0,552	0,520	0,515	0,929	1,223
N7-105°-60s-4		60	0,704	0,665	0,657	1,205	
N7-105°-60s-5		60	0,773	0,727	0,721	0,765	
N7-105°-80s-1	105	80	0,645	0,601	0,602	-0,168	
N7-105°-80s-2		80	0,655	0,614	0,611	0,434	-0,108
N7-105°-80s-3		80	0,574	0,534	0,536	-0,326	
N7-105°-80s-4		80	0,713	0,663	0,665	-0,373	
N7-105°-100s-1	105	100	0,611	0,570	0,570	-0,049	
N7-105°-100s-2		100	0,581	0,542	0,542	-0,052	-0,090
N7-105°-100s-3		100	0,645	0,601	0,602	-0,168	
N7-105°-120s-1	105	120	0,629	0,586	0,587	-0,184	
N7-105°-120s-2		120	0,622	0,582	0,581	0,250	0,013
N7-105°-120s-3		120	0,583	0,544	0,544	-0,027	
N7-105°-200s-1	105	200	0,684	0,636	0,638	-0,378	
N7-105°-200s-2		200	0,719	0,666	0,671	-0,757	-0,691
N7-105°-200s-3		200	0,756	0,699	0,706	-0,938	

Trocknungszeit variiert bei gleichbleibender Temperatur
N7-105°C

23°C/50%rF

Probenname	Temperatur	Zeit	Gewicht feucht	Gewicht feucht	Gewicht trocken	Feuchtezuschlag	Mittelwert
	[°C]	[s]	[g]	nach Trocknung [g]	[g]	[%]	Feuchtezuschlag
N7-105°-300s-1	105	300	0,729		0,677	7,681	
N7-105°-300s-2		300	0,840		0,776	8,247	
N7-105°-300s-3		300	0,901		0,834	8,034	
N7-105°-300s-4		300	0,765		0,714	7,143	
N7-105°-300s-5		300	0,819		0,755	8,477	
N7-105°-300s-6		300	0,813		0,752	8,112	
N7-105°-300s-7		300	0,744		0,691	7,670	7,842
N7-105°-300s-8		300	0,832		0,774	7,494	
N7-105°-300s-9		300	0,766		0,710	7,887	
N7-105°-300s-10		300	0,991		0,920	7,717	
N7-105°-300s-11		300	0,705		0,653	7,963	
N7-105°-300s-12		300	0,795		0,735	8,163	
N7-105°-300s-13		300	0,700		0,652	7,362	
						STABW	0,377
N7-105°-20s-1	105	20	0,796	0,794	0,738	7,571	
N7-105°-20s-2		20	0,844	0,840	0,783	7,331	7,393
N7-105°-20s-3		20	0,764	0,760	0,708	7,278	
N7-105°-40s-1	105	40	0,845	0,820	0,784	4,652	
N7-105°-40s-2		40	0,865	0,843	0,802	5,100	4,828
N7-105°-40s-3		40	0,763	0,741	0,708	4,733	
N7-105°-60s-1	105	60	0,814	0,768	0,755	1,748	
N7-105°-60s-2		60	0,955	0,905	0,886	2,196	1,851
N7-105°-60s-3		60	0,945	0,890	0,876	1,566	
N7-105°-60s-4		60	0,707	0,668	0,656	1,893	
N7-105°-70s-1	105	70	0,944	0,891	0,875	1,788	
N7-105°-70s-2		70	0,868	0,812	0,805	0,885	
N7-105°-70s-3		70	0,920	0,864	0,853	1,278	1,035
N7-105°-70s-4		70	0,869	0,813	0,806	0,893	
N7-105°-70s-5		70	0,761	0,708	0,706	0,332	
N7-105°-75s-1	105	75	0,815	0,761	0,756	0,697	
N7-105°-75s-2		75	0,808	0,750	0,749	0,101	0,425
N7-105°-75s-3		75	0,732	0,682	0,679	0,476	
N7-105°-80s-1	105	80	0,905	0,841	0,839	0,216	
N7-105°-80s-2		80	0,906	0,841	0,840	0,105	
N7-105°-80s-3		80	0,943	0,873	0,874	-0,163	0,168
N7-105°-80s-4	105	80	0,785	0,730	0,728	0,286	
N7-105°-80s-5		80	0,700	0,652	0,649	0,447	
N7-105°-80s-6		80	0,712	0,661	0,660	0,118	
N7-105°-100s-1	105	100	0,840	0,779	0,779	0,011	
N7-105°-100s-2		100	0,884	0,822	0,820	0,279	0,120
N7-105°-100s-3		100	0,888	0,824	0,823	0,070	
N7-105°-120s-1	105	120	0,818	0,758	0,759	-0,068	
N7-105°-120s-2		120	0,863	0,801	0,800	0,095	0,119
N7-105°-120s-3		120	0,774	0,722	0,718	0,597	
N7-105°-120s-4		120	0,756	0,700	0,701	-0,146	
N7-105°-200s-1	105	200	0,684	0,632	0,634	-0,356	
N7-105°-200s-2		200	0,687	0,637	0,637	-0,006	-0,093
N7-105°-200s-3		200	0,681	0,632	0,631	0,083	

Trocknungszeit variiert bei gleichbleibender Temperatur
N8-105°C

18°C/40%rF

Probenname	Temperatur	Zeit	Gewicht feucht	Gewicht feucht	Gewicht trocken	Feuchtezuschlag	Mittelwert
	[°C]	[s]	[g]	nach Trocknung [g]	[g]	[%]	Feuchtezuschlag
N8-105°-300s-1	105	300	0,612		0,569	7,557	
N8-105°-300s-2		300	0,615		0,570	7,895	
N8-105°-300s-3		300	0,568		0,525	8,190	
N8-105°-300s-4		300	0,571		0,531	7,533	
N8-105°-300s-5		300	0,567		0,527	7,590	
N8-105°-300s-6		300	0,559		0,517	8,124	7,862
N8-105°-300s-7		300	0,659		0,610	8,033	
N8-105°-300s-8		300	0,607		0,564	7,624	
N8-105°-300s-9		300	0,612		0,567	7,937	
N8-105°-300s-10		300	0,542		0,500	8,400	
N8-105°-300s-11		300	0,598		0,555	7,748	
N8-105°-300s-12		300	0,614		0,570	7,719	
						STABW	0,281
N8-105°-20s-1	105	20	0,571	0,569	0,529	7,485	
N8-105°-20s-2		20	0,604	0,601	0,560	7,327	7,385
N8-105°-20s-3		20	0,622	0,619	0,577	7,342	
N8-105°-40s-1	105	40	0,599	0,582	0,555	4,801	
N8-105°-40s-2		40	0,620	0,600	0,575	4,383	4,484
N8-105°-40s-3		40	0,465	0,449	0,431	4,151	
N8-105°-40s-4		40	0,529	0,513	0,490	4,600	
N8-105°-60s-1	105	60	0,561	0,526	0,520	1,133	
N8-105°-60s-2		60	0,507	0,476	0,470	1,267	1,256
N8-105°-60s-3		60	0,681	0,640	0,631	1,369	
N8-105°-80s-1	105	80	0,577	0,539	0,535	0,759	
N8-105°-80s-2		80	0,620	0,578	0,575	0,556	0,549
N8-105°-80s-3		80	0,530	0,493	0,491	0,332	
N8-105°-100s-1	105	100	0,572	0,530	0,530	-0,057	
N8-105°-100s-2		100	0,577	0,535	0,535	0,011	-0,083
N8-105°-100s-3		100	0,575	0,532	0,533	-0,204	
N8-105°-120s-1	105	120	0,575	0,533	0,533	-0,016	
N8-105°-120s-2		120	0,606	0,563	0,562	0,209	0,171
N8-105°-120s-3		120	0,572	0,532	0,530	0,320	
N8-105°-200s-1	105	200	0,575	0,534	0,533	0,171	
N8-105°-200s-2		200	0,599	0,556	0,555	0,119	0,212
N8-105°-200s-3		200	0,574	0,534	0,532	0,346	

Trocknungszeit variiert bei gleichbleibender Temperatur
N8-105°C

23°C/50%rF

Probenname	Temperatur	Zeit	Gewicht feucht	Gewicht feucht	Gewicht trocken	Feuchtezuschlag	Mittelwert
	[°C]	[s]	[g]	nach Trocknung [g]	[g]	[%]	Feuchtezuschlag
N8-105°-300s-1	105	300	0,615		0,570	7,895	
N8-105°-300s-2		300	0,632		0,585	8,034	
N8-105°-300s-3		300	0,668		0,622	7,395	
N8-105°-300s-4		300	0,666		0,619	7,593	
N8-105°-300s-5		300	0,685		0,639	7,199	
N8-105°-300s-6		300	0,655		0,610	7,377	7,552
N8-105°-300s-7		300	0,661		0,615	7,480	
N8-105°-300s-8		300	0,658		0,612	7,516	
N8-105°-300s-9		300	0,664		0,617	7,618	
N8-105°-300s-10		300	0,651		0,604	7,781	
N8-105°-300s-11		300	0,652		0,607	7,414	
N8-105°-300s-12		300	0,645		0,601	7,321	
						STABW	0,246
N8-105°-20s-1	105	20	0,605	0,602	0,563	7,019	
N8-105°-20s-2		20	0,715	0,710	0,665	6,800	6,941
N8-105°-20s-3		20	0,588	0,585	0,547	7,003	
N8-105°-40s-1	105	40	0,584	0,567	0,543	4,421	
N8-105°-40s-2		40	0,716	0,691	0,666	3,797	4,041
N8-105°-40s-3		40	0,585	0,564	0,544	3,691	
N8-105°-40s-4		40	0,587	0,569	0,546	4,254	
N8-105°-60s-1	105	60	0,628	0,593	0,584	1,558	
N8-105°-60s-2		60	0,627	0,587	0,583	0,691	
N8-105°-60s-3		60	0,642	0,604	0,597	1,186	1,111
N8-105°-60s-4		60	0,683	0,645	0,635	1,568	
N8-105°-60s-5		60	0,676	0,632	0,629	0,551	
N8-105°-80s-1	105	80	0,642	0,600	0,597	0,516	
N8-105°-80s-2		80	0,653	0,606	0,607	-0,189	0,252
N8-105°-80s-3		80	0,673	0,629	0,626	0,520	
N8-105°-80s-4		80	0,655	0,610	0,609	0,163	
N8-105°-100s-1	105	100	0,641	0,597	0,596	0,169	
N8-105°-100s-2		100	0,717	0,665	0,667	-0,248	-0,038
N8-105°-100s-3		100	0,638	0,593	0,593	-0,034	
N8-105°-120s-1	105	120	0,610	0,567	0,567	-0,030	
N8-105°-120s-2		120	0,581	0,541	0,540	0,147	0,145
N8-105°-120s-3		120	0,565	0,527	0,525	0,318	
N8-105°-200s-1	105	200	0,707	0,660	0,657	0,402	
N8-105°-200s-2		200	0,649	0,606	0,603	0,426	0,360
N8-105°-200s-3		200	0,663	0,618	0,616	0,252	

Literaturverzeichnis

Abbey et al. 2010

Brian Abbey, Sophie Eve, Anthony Thuault, Karine Charlet, Alexander Korsunsky, *Synchrotron x-ray tomographic investigation of internal structure of individual flax fibres*, in: 6th World Congress of Biomechanics (WCB 2010), August 1—6 2010, Singapore. [= IFMBE Proceedings Vol. 31], 2010, S. 1151—1154.

Abbott et al. 1964

N. J. Abbott, F. Khoury, L. Barish, *The mechanism of fabric shrinkage: The role of fibre swelling*, Journal of the Textile Institute **55** 1964, S. T111—T127.

Ackroyd 1998

Paul Ackroyd, *Past and present methods for the removal of severe distortions in canvas paintings*, The Picture Restorer (14) 1998, S. 13—19.

Ackroyd 2002

Paul Ackroyd, *The structural conservation of canvas paintings: changes in attitude and practice since the early 1970s*, Reviews in Conservation (3) 2002, S. 3—14.

Ackroyd 2005

Paul Ackroyd, *The long-term aims of lining treatments for canvas paintings: are they achievable?*, in: Preprints International conference on painting conservation. Canvases: behaviour, deterioration and treatment. 9—11 March 2005. María Castell Agustí, Laura Fuster López, Susanna Martín Rey, Vicente Guerola Blay (Hrsg.), Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2005, S. 173—184.

Ackroyd et al. 2002

Paul Ackroyd, Alan Phenix, Caroline Villers, Nancy Wade, *Structural treatments for canvas paintings in 2002: summary of questionnaire replies*, in: ICOM Committee for Conservation 13th triennial meeting preprints, Rio de Janeiro, 22-27 September 2002. Roy Vontobel (Hrsg.), James & James, London 2002, S. 321—327.

Agster 1963

Andreas Agster, *Die Bestimmung des Polymerisationsgrades kunstharzbehandelter oder reaktiv gefärbter Zellulosefasern*, Textil-Praxis **18** 1963, S. 577—583.

Agster 1968

Andreas Agster, *Die Messug des Polymerisationsgrades von Zellulosefasern und die Bedeutung der Kettenlängendifferenz*, Deutsche Textiltechnik **18** (6) 1968, S. 363—371.

Andersen 2013

Cecil Krarup Andersen, *Lined canvas paintings: Mechanical properties and structural response to fluctuating relative humidity, exemplified by the collection of Danish Golden Age paintings at Statens Museum for Kunst (SMK)*, Dissertation, The Royal Danish Academy of Fine Arts, Schools of Architecture, Design and Conservation, 2013.

Andersen et al. 2009

Cecil Krarup Andersen, Troels Filtenborg, Annemette B. Scharff, Mikkel Scharff, *The industrialisation of canvas production in Denmark and its implications for the preservation of Danish nineteenth century paintings*, in: Incredible Industry: Preserving the evidence of industrial society, Conference proceedings Nordic Association of Conservators 18. conference, Mai 2009. Morten Ryhl-Svendsen, Karen Borchersen, Winnie Odder (Hrsg.), Hvidovre Bogtryk, Hvidovre 2009, S. 39—49. Auch zugänglich über https://www.researchgate.net/profile/Cecil_Andersen/publication/268332681_The_Industrialisation_of_Canvas_Production_and_its_Implications_for_the_preservation_of_Nineteenth_Century_Paintings/links/5468d01e0cf20dedafd0d3c0.pdf.

Ashley-Smith et al. 2013

Jonathan Ashley-Smith, Andreas Burmester, Melanie Eibl, *Climate for collections. Standards and uncertainties, Postprints of the Munich Climate Conference 7.— 9. November 2012*, Archetype, London 2013.

Astley/Donald 2003

Owen M. Astley, Athene M. Donald, *The tensile deformation of flax fibres as studied by X-ray scattering*, Journal of Materials Science **38** 2003, S. 165—171.

Atkinson 2014

Jo Kirby Atkinson, *Environmental conditions for the safeguarding of collections: A background to the current debate on the control of relative humidity and temperature*, Studies in Conservation **59** (4) 2014, S. 205—212.

Backes 2005

Stephanie Backes, *Untersuchungen zur Veränderung von Flachs- und Hanffasern durch die Behandlung mit Bioziden*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Fachhochschule Hildesheim Göttingen Holzminden, Studiengang Konservierung und Restaurierung, 2005.

Ballard 1996

Mary W. Ballard, *Hanging out. Strength, elongation and relative humidity: some physical properties of textile fibres*, in: ICOM Committee for Conservation 11th triennial meeting preprints, Edinburgh, 1–6 September 1996. Janet Bridgland (Hrsg.), James & James, London 1996, S. 665—669.

Banik 2015

Gerhard Banik, *Säuren, Basen und das pH-Konzept*, in: Papier und Wasser: Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Gerhard Banik, Irene Brückle (Hrsg.), Siegl, München 2015, S. 65—87.

Banik/Brückle 2015

Gerhard Banik, Irene Brückle, *Papier und Wasser: Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher*, Siegl, München 2015.

Bansa 2002

Helmut Bansa, *Accelerated ageing of paper: some ideas on its practical benefit*, Restaurator **23** (2) 2002, S. 106—117.

Barlow 1878

Alfred Barlow, *History and principles of weaving by hand and by power*, London 1878.

Batra 2007

Subhash K. Batra, *Other long vegetable fibers*, in: Handbook of fiber chemistry. Menachem Lewin, Eli M. Pearce (Hrsg.), [=International Fiber Science and Technology Series 16], 3rd Ed., CRC Press, New York 2007, S. 453—520.

Bauer 2011

Jasmin Bauer, *Historische Bleichverfahren*, unveröffentlichte Semesterarbeit, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Studiengang Konservierung und Restaurierung, 2011.

Bégin/Kaminska 2002

P.L. Bégin, E. Kaminska, *Thermal accelerated ageing test method development*, Restaurator **23** (2) 2002, S. 89—105.

Bennke 2007

Anne-Sophie Bennke, *Absorptionsisotherme, Hygrische Dehnung und Zug-Dehnverhalten von ungealtertem, gedehntem und degradiertem Flachsgewebe. Vergleich der Untersuchungsergebnisse aus den Semesterarbeiten von Tost, Dick und Neufert*, unveröffentlichte Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2007.

Berger 1981

Gustav A. Berger, *The role of tension in the preservation of canvas paintings: a study of panoramas*, in: ICOM Committee for Conservation 6th triennial meeting preprints, Ottawa, 21—25 September 1981. International Council of Museums, Paris 1981, S. 81/2/3-1 — 81/2/3-12.

Berger 2000

Gustav A. Berger, *The use of water in the conservation of canvas paintings*, in: Conservation of paintings: research and innovations. Gustav A. Berger, William H. Russel (Hrsg.), Archetype Publications, London 2000, S. 63—79.

Berger/Russell 1984

Gustav A. Berger, William H. Russell, *The new stress tests on canvas paintings and some of their implications on the preservation of paintings*, in: ICOM Committee for Conservation 7th triennial meeting preprints, Copenhagen, 10—14 September 1984. Diana de Froment (Hrsg.), International Council of Museums in association with the J. Paul Getty Trust, Paris 1984, S. 84.2.7—84.2.9.

Berger/Russell 1986

Gustav A. Berger, William H. Russell, *Investigations into the reactions of plastic materials to environmental changes. Part I. The mechanics of the decay of paint films*, Studies in Conservation **31** 1986, S. 49—64.

Berger/Russell 1988

Gustav A. Berger, William H. Russell, *An evaluation of the preparation of canvas paintings using stress measurements*, Studies in Conservation **33** 1988, S. 187—204.

Berger/Russell 1989

Gustav A. Berger, William H. Russell, *Untersuchungen zum Einfluß der Umwelt auf die Erhaltung von Leinwandgemälden*, Restauro **95** (3) 1989, S. 191—203.

Berger/Russell 1994

Gustav A. Berger, William H. Russell, *Interaction between canvas and paint film in response to environmental changes*, Studies in Conservation **39** 1994, S. 73—86.

Berger/Russell 2000

Gustav A. Berger, William H. Russell, *Effects of the environment on the deterioration of canvas paintings*, in: Conservation of paintings: research and innovations. Gustav A. Berger, William H. Russel (Hrsg.), Archetype Publications, London 2000, S. 277—295.

Bernard 1967

Walter Bernard, *Appretur der Textilien*, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin 1967.

Bernhard/Oppermann 2004

K. Bernhard, W. Oppermann, *Molar mass distribution of cellulose by analytical ultracentrifugation*, Lenzinger Berichte **83** 2004, S. 60—63.

Bilson 1996

Thomas Bilson, *Canvas shrinkage: a preliminary investigation into the response of a woven structure*, in: ICOM Committee for Conservation 11th triennal meeting preprints, Edinburgh 1—6 September 1996. ICOM Committee for Conservation (Hrsg.), James & James, London 1996, S. 245—252.

Bobeth 1941

Wolfgang Bobeth, *Die wahre Feuchtigkeitsaufnahme verschiedener Faserstoffe und deren Mischungen bei Normbedingungen als Grundlage für die Berechnung von quantitativ-chemischen Mischgespinstanalysen*, Klepzigs Textilzeitschrift **44** (35) 1941, S. 975—982.

Bobeth 1993

Wolfgang Bobeth, *Textile Faserstoffe*, Springer Verlag, Berlin 1993.

Bohnsack 1981

Almut Bohnsack, *Spinnen und Weben: Entwicklung von Technik und Arbeit im Textilgewerbe*, Hamburg 1981.

Bratasz et al. 2012

Lukasz Bratasz, A. Kozlowska, Roman Kozlowski, *Analysis of water adsoption by wood using the Guggenheim-Anderson-de Boer equation*, European Journal of Wood and Wood Products **70** (4) 2012, S. 445—451.

Bräunig 2012

Theresa Bräunig, *Zugfestigkeit-Polymerisationsgrad. Nullreißlänge-Kapillarviskosimetrie. Bestimmung der Höchstzugkraft mittels Nullreißlänge an Garnen und der Zusammenhang mit der Grenzviskositätszahl*, unveröffentlichte Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2012.

Bräunig et al. 2016

Theresa Bräunig, Anna von Reden, Dirk Lichtblau, Christoph Herm, *Eine neue Technik zur Bestimmung der Festigkeit von textilen Bildträgern und ihr Zusammenhang mit dem Polymerisationsgrad der Celluose*, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung **30** (2) 2016, S. 351—362.

Brückle 2015a

Irene Brückle, *Stoffaufbereitung*, in: Papier und Wasser: Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Gerhard Banik, Irene Brückle (Hrsg.), Siegl, München 2015, S. 129—154.

Brückle 2015b

Irene Brückle, *Struktur und Eigenschaften von trockenem und nassem Papier*, in: Papier und Wasser: Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Gerhard Banik, Irene Brückle (Hrsg.), Siegl, München 2015, S. 89—128.

Burmester/Eibl 2014

Andreas Burmester, Melanie Eibl, *Stable is safe. Die Münchner Positionen zu Klima und Kulturgut*. 2014, Zugriff 20.06.2017, http://www.doernerinstitut.de/downloads/Stellungnahme_Doerner_Bizot_de.pdf.

Cardamone 2001

Jeanette M. Cardamone, *The aging, degadation, and conservation of historic materials made from cellulosic fibers*, in: Historic textiles, papers, and polymers in museums. Jeanette M. Cardamone, Mary T. Baker (Hrsg.), [=ACS Symposium Series Bd. 779], American Chemical Society, Washington 2001, S. 8—22.

Carlyle et al. 2008

Leslie Carlyle, Christina Young, Suzanne Jardine, *The mechanical response of flour-paste grounds*, in: Preparation for painting: The artist´s choice and its consequences. Joyce H. Townsend, Tiarna Doherty, Gunnar Heydenreich, Jacqueline Ridge (Hrsg.), Archetype Publications, London 2008, S. 123—131.

Carr et al. 2003a

D. J. Carr, M. Odlyha, N. Cohen, A. Phenix, R. D. Hibberd, *Thermal analysis of new, artificially aged and archival linen*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry **73** 2003, S. 97—104.

Carr et al. 2003b

D. J. Carr, C. R. T. Young, A. Phenix, R. D. Hibberd, *Development of a physical model of a typical nineteenth-century English canvas painting*, Studies in Conservation **48** 2003, S. 145—54.

Castell Agustí et al. 2005

María Castell Agustí, Laura Fuster López, Susanna Martín Rey, Vicente Guerola Blay, *Preprints to the Interim Meeting: International conference on painting conservation. Canvases: behaviour, deterioration and treatment. 9—11 März 2005*, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2005.

Chakravarty 1971

A. C. Chakravarty, *Swelling behavior and comparative porosity of some vegetable textile fibers at different moisture regains*, Textile Research Journal **41** 1971, S. 318—321.

Chan et al. 1994

T. Y. Amy Chan, Marianne Odlyha, Mikkel Scharff, *In situ non-invasive dielectric spectroscopy for monitoring conservation treatment of canvas paintings*, in: 4. Internationale Konferenz Zerstörugsfreie Untersuchungen an Kunst- und Kulturgütern, Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin 1994, S. 510—520.

Chan et al. 1995

T. Y. Amy Chan, Marianne Odlyha, Mikkel Scharff, *In situ dielectric analysis for canvas paintings*, The Conservator **19** 1995, S. 10—19.

Chen 1998

Runying Chen, *A study of cotton fibers recovered from a marine environment*, Dissertation, Ohio State University, 1998.

Collins 1939

G. E. Collins, *Fundamental principles that govern the shrinkage of cotton goods by washing*, Journal of the Textile Institute **30** (3) 1939, S. P46—P61.

Cooke et al. 1996

W. D. Cooke, A. Babakhani, L. Hillyer, *The cleaning of degraded linen, Part 1 and 2*, The Conservator **20** 1996, S. 3—14.

Corte 1980

Heinz Corte, *Cellulose-water interactions*, in: Handbook of paper science 1: The raw materials and processing of papermaking. Herbert F. Rance (Hrsg.), Elsevier, Amsterdam 1980, S. 1—89.

Cotterill 1950

E. Cotterill, *Relative humidity and rayon*, Journal of the Textile Institute **41** (1) 1950, S. P9—P15.

Crank 1960

J. Crank, *Rate of change of moisture content*, in: Moisture in Textiles. J. W. S. Hearle, R. H. Peters (Hrsg.), Butterworth, London 1960, S. 83—93.

Dambroth/Seehuber 1988

Manfred Dambroth, Reinhard Seehuber, *Flachs: Züchtung, Anbau und Verarbeitung*, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart 1988.

Davis 2003

Mary Davis, *Low vacuum scanning electron microscopy at the National Museums and Galleries of Wales*, in: Conservation Science 2002: papers from the conference in Edinburgh, 22—24 May 2002. Joyce H. Townsend, Katherine Eremin, Annemie Adriaens (Hrsg.), Archetype Publications Ltd., London 2003, S. 264—270.

Dick 2006

Helena Dick, *Untersuchungen zum Dehnverhalten von Leinwand in Bezug zur Webdichte*, unveröffentlichte Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2006.

Dittrich/Reumann 1996

Jens-Holm Dittrich, Ralf D. Reumann, *Hygrale Expansion-wichtige Kenngröße für die Konfektion, Teil 1*, Bekleidung **48** (2) 1996, S. 37—41 [dieser Artikel ist fortgesetzt mit Literaturverzeichnis in Heft 4, S. 31—41 und Heft 8 S. 44.].

Doerner 1922

Max Doerner, *Malmaterial und seine Verwendung im Bilde*, 2. Aufl., Verlag für praktische Kunstwissenschaft Weizinger & Co., München 1922.

Dornstädter 2011

Patricia Dornstädter, *Der Stammbaum der Grafen von Montfort - kunsttechnologische Untersuchung, Konservierung und Präsentation*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Studiengang Konservierung und Restaurierung, 2011.

Drexler 1999

Ann Kristin Drexler, *PH-Metrie und Mikro-Kapillarviskosimetrie als Möglichkeit zur chemisch-physikalischen Charakterisierung textiler Bildträger*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Berner Fachhochschule - Schule für Gestaltung, Kunst und Konservierung, Studiengang Konservierung und Restaurierung, 1999.

Driesch 1951

Hans Driesch, *Mechanische Spinnerei*, Fachverlag Schiele & Schön, Berlin, 1951

[= Textil- und Bekleidungsgewerbe Schriften zur Berufsfortbildung, Band 14].

Du Pont Cornelius 1967

F. Du Pont Cornelius, *Movement of wood and canvas for paintings in response to high and low RH cycles*, Studies in Conservation **12** 1967, S. 76—80.

Dulieu-Barton et al. 2005

Janice M. Dulieu-Barton, Leonidas Dokos, Dinah Eastop, Frances Lennard, Alan R. Chambers, Melin Sahin, *Deformation and strain measurement techniques for the inspection of damage in works of art*, Reviews in Conservation (6) 2005, S. 63—73.

Ebert 1993

Gotthold Ebert, *Biopolymere: Struktur und Eigenschaften*, Teubner, Stuttgart, 1993 [=Teubner Studienbücher Chemie].

Edwards et al. 2006

Howell G. M. Edwards, Nik F. Nikhassan, Dennis W. Farwell, Paul Garside, Paul Wyeth, *Raman spectroscopic analysis of a unique linen artefact: the HMS Victory Trafalgar sail*, Journal of Raman Spectroscopy **37** (10) 2006, S. 1193—1200.

Eibner 1928

Alexander Eibner, *Entwicklung und Werkstoffe der Tafelmalerei*, Verlag B. Heller, München 1928.

Erhardt/Mecklenburg 1995

David Erhardt, Marion F. Mecklenburg, *Accelerated vs. natural aging: effect of aging conditions on the aging process of cellulose*, in: Materials issues in art and archaeology IV: symposium held May 16—21, 1994, Cancun, Mexico. Pamela B. Vandiver, James R. Druzik, Jose Luis Galvan Madrid, Ian C. Freestone, George Segan Wheeler (Hrsg.), [=Materials Research Society symposium proceedings, Vol. 352], Materials Research Society, Warrendale 1995, S. 247—270.

Fakin et al. 2006

D. Fakin, V. Golob, K. Stana Kleinschek, A. Majcen Le Marechal, *Sorption properties of flax fibers depending on pretreatment processes and their environmental impact*, Textile Research Journal **76** (6) 2006, S. 448—454.

Fan et al. 1987

Liang-Tseng Fan, Mahendra M. Gharpuray, Yong-Hyun Lee, *Cellulose Hydrolysis*, in: Biotechnology Monographs Bd. 3. Springer Verlag, Berlin 1987.

Florian 1987

Mary-Lou E. Florian, *Deterioration of organic materials other than wood*, in: Conservation of marine archaeological objects. Colin Pearson (Hrsg.),

[= Butterworths Series in Conservation and Museology, Stephen Rees-Jones (Hrsg.)], Butterworths, London 1987, S. S. 21—54.

Franck 2005

Robert R. Franck, *Bast and other plant fibres*, Woodhead Publishing Limited, Cambridge 2005.

Frimmel 1904

Theodor von Frimmel, *Handbuch der Gemäldekunde*, 2. Auflage, J. J. Weber, Leipzig 1904.

Fuzek 1985

John F. Fuzek, *Absorption and desorption of water by some common fibers*, Industrial and Engineering Cemistry. Product Research and Development **24** 1985, S. 140—144.

Gál 1967

Stefan Gál, *Die Methodik der Wasserdampf-Sorptionsmessungen*, Springer Verlag, Berlin, 1967

Ganster/Fink 1999

J. Ganster, Hans-Peter Fink, *Physical constants of cellulose*, in: Polymer handbook Vol. 1. J. Brandrup, E. H. Immergut, E. A. Grulke (Hrsg.), 4. Auflg., Wiley & Sons, Hoboken 1999, S. V/135—V/157.

Garside et al. 2005

Paul Garside, Robert Miles, Mira Naftaly, Mark Stringer, Paul Wyeth, *Assessing near infrared and terahertz spectroscopy for the characterisation of organic heritage artefacts*, in: 8th International Conference on "Non-destructive investigations and microanalysis for the diagnostics and conservation of the cultural and environmental heritage": Lecce (Italy), 15—19 May 2005. C. Parisi, G. Buzzanca, A. Paradisi (Hrsg.), 2005.

Garside/Richardson 2008

Paul Garside, E. Richardson, *Assessing the physical state of historic textiles via NIR spectroscopy*, in: Cultural Heritage Research meets Practice. 8th European Conference on Research for Protection, Conservation and Enhancement of Cultural Heritage November 10—12, 2008, Ljubljana, Slovenia, Book of abstracts. Jana Kolar, Matija Strlič (Hrsg.), 2008, S. 91.

Garside/Wyeth 2003

Paul Garside, Paul Wyeth, *Monitoring the deterioration of historic textiles: developing appropriate micromethodology*, in: Conservation science 2002: papers from the conference held in Edinburgh, Scotland 22—24 May 2002. Archetype Publications, London 2003, S. 171—176.

Garside/Wyeth 2004

Paul Garside, Paul Wyeth, *Polarised ATR-FTIR characterisation of cellulosic fibres in relation to historic artefacts*, Restaurator **25** (4) 2004, S. 249—259.

Garside/Wyeth 2006

Paul Garside, Paul Wyeth, *Identification of cellulosic fibres by FTIR spectroscopy*, Studies in Conservation **51** (3) 2006, S. 205—211.

Gilroy et al. 1847

Clinton G. Gilroy, P. Falcot, George White, *Vollständiges Handbuch der Webekunst in Baumwolle, Leinen, Wolle und Seide, mit Hand- und mit Maschinen-Webestühlen, sowohl zur Anfertigung der glatten, als auch der geköperten und gemusterten Zeuche*, Voigt, Weimar, 1847

Gramatke 2009

Corinna Gramatke, *Drei spanische maltechnische Texte des Barock. Kommentierte Übersetzung ins Deutsche der Passagen aus Vicente Carducho, Diálogos de la pintura (1633), Francisco Pacheco, Arte de la pintura (1649) und Antonio Palomino, El museo pictórico y escala óptica (1715—24)*, Dissertation, Hochschule für Bildende Künste Dresden, 2009.

Grattan 1987

D. W. Grattan, *Waterlogged wood*, in: Conservation of marine archaeological objects. Colin Pearson (Hrsg.), [= Butterworths Series in Conservation and Museology, Stephen Rees-Jones (Hrsg.)], Butterworths, London 1987, S. S. 55—67.

Grothe 1861

Hermann Grothe, *Katechismus der Spinnerei, Weberei und Appretur oder Lehre von der mechanischen Verarbeitung der Gespinnstfasern*, Weber, Leipzig 1861.

Grothe 1868

Hermann Grothe, *Die Spinnerei, Weberei und Appretur auf der Welt-Ausstellung zu Paris 1967*, Springer Verlag, Berlin 1868.

Guilly et al. 1981

R. Guilly, M. Sotton, M. Chevalier, *Etude de l'opération de décatissage des toiles de doublage en lin. Analyse comparative des caractéristiques des toiles décaties artisanalement et industriellement*, in: ICOM Committee for Conservation 6th triennial meeting preprints, Ottawa, 21—25 September 1981. ICOM Committee for Conservation (Hrsg.), The International Council of Museums, Paris 1981, S. 81/2/4-1—81/2/4-14.

Haaf 1987

Beatrix Haaf, *Industriell vorgrundierte Malleinen*, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung **1** (2) 1987, S. 7—71.

Hackel 1999

Doris Hackel, *Traditionelle Faserpflanzen: Flachs und Hanf*, Hennebergisches Museum, Kloster Veßra 1999.

Hackney/Hedley 1981

Stephen Hackney, Gerry Hedley, *Measurements of the ageing of linen canvas*, Studies in Conservation **26** 1981, S. 1—14.

Hackney/Hedley 1984

Stephen Hackney, Gerry Hedley, *Linen canvas artificially aged*, in: ICOM Committee for Conservation 7th triennial meeting preprints, Copenhagen, 10—14 September 1984. Diana de Froment (Hrsg.), International Council of Museums in association with the J. Paul Getty Trust, Paris 1984, S. 84.2.16—84.2.21.

Halle 1761

Johann Samuel Halle, *Werkstätte der heutigen Künste, oder die neue Kunsthistorie: Erster Band*, Brandenburg, Leipzig 1761.

Haller 2007

Ursula Haller, *Gemälde im VP-REM: Beobachtungen zum Feuchteverhalten von Werkstoffen der Malerei. Eine Projektskizze*, in: Wasser: Beiträge zur 20. Tagung des Österreichischen Restauratorenverbandes November 2006. Österreichischer Restauratorenverband (Hrsg.), Remaprint, Wien 2007, S. 20—27.

Haller/Hilden 2010

Ursula Haller, Stephanie Hilden, *Die Konservierung und Restaurierung der bemalten Rokoko-Wandbespannungen im Herrenhaus Ermlitz*, Denkmalpflege in Sachsen-Anhalt / Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt; Landesmuseum für Vorgeschichte **18** (1) 2010, S. 4—13.

Haller et al. 2012

Ursula Haller, Stephanie Hilden, Karin Krüger, *The Ermlitz project: Conservation and mounting of 130 square meters of painted wall hangings*, Studies in Conservation Vol. 57, Supplement 1 [= Contributions to the Vienna Congress of the International Institute for Conservation 2012] 2012, S. S138—S146.

Haller et al. 2017

Ursula Haller, Sandra Plötz, Helena Dick, Emilia Sleczek, Mandy Hellinger, *Bildnis ohne Gesicht. Konservierung, Restaurierung und Teilrekonstruktion eines lebensgroßen Portraits Philipp Melanchthons*, in: Kunstwerke der Reformation – erforscht und restauriert. Beiträge zum 9. Restauratorentag 2015 in der Lutherstadt Wittenberg. Verband der Restauratoren e.V. (VDR) (Hrsg.), Imhof Verlag, Petersberg 2017. [Publikation derzeit im Druck].

Harris 1954

Milton Harris, *Handbook of textile fibers*, Harris Research Laboratories, Washington D. C. 1954.

Hartley et al. 1992

I. D. Hartley, F. A. Kamke, H. Peemoeller, *Cluster theory for water sorption in wood*, Wood Science and Technology **26** 1992, S. 83—99.

Haudek/Viti 1981

Heinz Werner Haudek, Erna Viti, *Textilfasern: Herkunft, Herstellung, Aufbau, Eigenschaften, Verwendung*, Verlag Johann L. Bondi & Sohn, Wien 1981.

Havermans 1995

Johannes B. G. A. Havermans, *Environmental influences on the deterioration of paper*, Dissertation, Technische Universiteit Delft, 1995.

Hearle 1960a

John William Stanley Hearle, *Fibres and liquid water*, in: Moisture in textiles. J. W. S. Hearle, R. H. Peters (Hrsg.), Butterworth, Manchester 1960, S. 178—188.

Hearle 1960b

John William Stanley Hearle, *The structure of fibres*, in: Moisture in textiles. J. W. S. Hearle, R. H. Peters (Hrsg.), Butterworth, Manchester 1960, S. 10—13.

Hearle/Peters 1960

John William Stanley Hearle, Raymond Harry Peters, *Moisture in Textiles*, Butterworth, London 1960.

Hedley 1988

Gerry Hedley, *Relative humidity and the stress strain response of canvas paintings: Uniaxial measurements of naturally aged samples*, Studies in Conservation **33** 1988, S. 133—148.

Hedley 1993

Gerry Hedley, *The practicalities of the interaction of moisture with oil paintings on canvas*, in: Measured Opinions. Collected papers on the conservation of paintings: Gerry Hedley. Caroline Villers (Hrsg.), United Kingdom Institute for Conservation, London 1993, S. 112—122.

Hedley et al. 1990

Gerry Hedley, Caroline Villers, Robert Bruce-Gardner, Rhona MacBeth, *A new method for treating water damage flaking*, in: ICOM Committee for Conservation 9th triennial meeting preprints, Dresden, 26—31 August 1990. Kirsten Grimstad (Hrsg.), ICOM Committee for Conservation, Los Angeles 1990, S. 119—123.

Heiber 2006

Winfried Heiber, *Der Gleitholzrahmen*, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung **20** (1) 2006, S. 47—62.

Hellinger 2012

Mandy Hellinger, *Kunsttechnologische Untersuchung von acht Gemälden Josef Hegenbarths auf textilem Bildträger und Pappe aus dem Lindenau-Museum Altenburg*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2012.

Hempel 2000

Peter Hempel, *Biaxiale Beanspruchung von Flächengebilden*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 433—435.

Henniges/Potthast 2015

Ute Henniges, Antje Potthast, *Charakterisierung von Papier*, in: Papier und Wasser: Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Gerhard Banik, Irene Brückle (Hrsg.), Siegl, München 2015, S. 275—318.

Hermans 1949

P. H. Hermans, *Physics and chemistry of cellulose fibres with particular reference to rayon*, Elsevier, New York 1949.

Heydenreich 2008

Gunnar Heydenreich, *The colour of canvas: historical practice for bleaching artists´ linen*, in: Preparation for Painting: The artist´s choice and its consequences. Joyce H. Townsend, Tiarna Doherty, Gunnar Heydenreich, Jacqueline Ridge (Hrsg.), Archetype Publications, London 2008, S. 30—41.

Heydenreich et al. 2008

Gunnar Heydenreich, David Carson, Cecily Grzywacz, Herant Khanjian, Joy Mazurek, Michael Schilling, *Painting on white canvas: sixteenth century bleaching practices and analysis of morphological and chemical changes in flax fibres*, in: ICOM Committee for Conservation 15th triennial conference, New Delhi, 22—26 September 2008. Janet Bridgland (Hrsg.), ICOM Committee for Conservation, Paris 2008, S. 609—618.

Hoehnel 1905

Franz Xaver von Hoehnel, *Die mikroskopie der technisch verwendeten Faserstoffe: Ein Lehr- und Handbuch der mikroskopischen Untersuchung der Faserstoffe, Gewebe und Papiere.*, 2. Auflg., A. Hartleben, Wien, Leipzig 1905.

Hofer 1994

Alfons Hofer, *Stoffe 2 - Bindung, Gewebemusterung, Veredlung*, 7. Auflage, Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main 1994.

Hofer 2000

Alfons Hofer, *Stoffe 1 - Rohstoffe: Fasern, Garne und Effekte*, 8. Auflage, Deutscher Fachverlag, Frankfurt am Main 2000.

Hofmann 2002

Sylvia Hofmann, *Drehungsrichtungen von Garnen und Zwirnen am Beispiel von Flachs und Hanf*, unveröffentlichte Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2002.

Holl 2016

Kristina Holl, *Der Einfluss von Klimaschwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext*, Dissertation, TU München, 2016.

Hon 1981

D. N.-S. Hon, *Photochemical degradation of lignocellulosic materials*, in: Developments in polymer degradation 3. N. Grassie (Hrsg.), Applied Science Publishers, London 1981, S. 229—281.

Hon 1996

David N.-S. Hon, *Chemical modification of lignocellulosic materials*, Marcel Dekker, New York 1996.

Hönig 1918

Fritz Hönig, *Beiträge zur Kenntnis der hygroskopischen Eigenschaften der Textilfasern unter Berücksichtigung der Entwicklung der Trocknungsapparate, -verfahren und -anstalten*, Teubner, Dresden, 1918 [= Dissertation Königl. Sächs. Technische Hochschule zu Dresden].

Howlett et al. 1942

Frank Howlett, M. Joan Morley, Alex R. Urquhart, *The chemical analysis of fibre mixtures*, Journal of the Textile Institute Transactions **33** (6) 1942, S. T75—T104.

Ioelovitch 1992

M. Ioelovitch, *Zur übermolekularen Struktur von nativen und isolierten Cellulosen*, Acta Polymerica **43** (2) 1992, S. 110—113.

Jayme/El-Kodsi 1970

Georg Jayme, Gamal El-Kodsi, *Bericht über die Tätigkeit der Arbeitsgruppe für die Viskositätsbestimmung cellulosehaltiger Stoffe im Verein Zellcheming von 1964 bis 1969*, Das Papier **24** (8) 1970, S. 501—509.

Johnson et al. 2011

Richard C. Johnson, Don H. Johnson, Naoto Hamashima, Heui Sung Yang, Ella Hendriks, *On the utility of spectral-maximum-based automated thread counting from x-radiographs of paintings on canvas*, Studies in Conservation **56** (2) 2011, S. 104—114.

Karlsson et al. 1989

J. O. Karlsson, M. Andersson, P. Berntsson, T. Chihanti, P. Gatenholm, *Swelling behavior of stimuli-responsive cellulose fibers*, Polymer **39** (16) 1989, S. 3589—3595.

Karpowicz 1989

Adam Karpowicz, *In-plane deformations of films of size on paintings in the glass transition region*, Studies in Conservation **34** 1989, S. 67—74.

Karpowicz 1990

Adam Karpowicz, *A study on development of cracks on paintings*, Journal of the American Institue for Conservation **29** (2) 1990, S. 169—180.

Kässberger 1998

Michael Käßberger, *Vorgänge im Papier bei dynamisch beschleunigter Alterung*, Dissertation, Technische Universität Graz, 1998.

Kast et al. 1955

W. Kast, O. Kratky, G. Porod, H. Stuart, *Übermolekulare Ordnungszustände in Systemen mit kristallisierenden Fadenmolekülen*, in: Die Physik der Hochpolymere. Dritter Band: Ordnungszustände und Umwandlungserscheinungen in festen hochpolymeren Stoffen. H. A. Stuart (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 1955, S. 188—368.

Kast 1988

Werner Kast, *Adsorption aus der Gasphase*, VCH Verlagsgesellschaft, Weinheim 1988.

Kato/Cameron 1999

K. L. Kato, R. E. Cameron, *Structure–property relationships in thermally aged cellulose fibers and paper*, Journal of Applied Polymer Science **74** (6) 1999, S. 1465—1477.

Kavkler et al. 2011

Katja Kavkler, Nina Gunde-Cimerman, Polona Zalar, Andrej Demšar, *FTIR spectroscopy of biodegraded historical textiles*, Polymer Degradation and Stability **96** (4) 2011, S. 574—580.

Keyser 1984

Barbara Whitney Keyser, *Restraint without stress, History and prospects: a literature review of paintings as structures*, Journal of the American Institute for Conservation **24** (1) 1984, S. 1—13.

Kind 1930

W. Kind, *Das Bleichen und Merzerisieren von Flachs*, in: Der Flachs: 1. Botanik, Kultur, Aufbereitung, Bleicherei und Wirtschaft des Flachses. W. Kind, P. Koenig, W. Müller, E. Schilling, C. Steinbrinck (Hrsg.), [= Technologie der Textilfasern V. Band, 1. Teil], Springer Verlag, Berlin 1930, S. 281—310.

Kind et al. 1930

W. Kind, P. Koenig, W. Müller, E. Schilling, C. Steinbrinck, *Der Flachs: 1. Botanik, Kultur, Aufbereitung, Bleicherei und Wirtschaft des Flachses*, Springer Verlag, Berlin, 1930 [= Technologie der Textilfasern V. Band, 1. Teil].

Kind 1932

Walter Kind, *Das Bleichen der Pflanzenfasern*, 3. Aufl., Springer Verlag, Berlin 1932.

Kleinert 1967

Theodor N. Kleinert, *Cellulose heterogeneities in linen fibres*, Holzforschung **21** (3) 1967, S. 77—81.

Kleinhansl 2000a

Ernst Kleinhansl, *Faserfeinheit*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 162—171.

Kleinhansl 2000b

Ernst Kleinhansl, *Kräuselung und Bauschigkeit*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 297—307.

Kleinhansl 2000c

Ernst Kleinhansl, *Verhalten gegenüber Feuchte und Wasser*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 207—217.

Klemm et al. 2005

Dieter Klemm, Brigitte Heublein, Hans-Peter Fink, Andreas Bohn, *Cellulose: faszinierendes Biopolymer und nachhaltiger Rohstoff*, Angewandte Chemie **117** (22) 2005, S. 3422—3458.

Klemm et al. 1998

Dieter Klemm, B. Philipp, Thomas Heinze, U. Heinze, W. Wagenknecht, *Comprehensive Cellulose Chemistry Vol. 1*, WILEY-VCH, Weinheim 1998.

Klopfer 1974

Heinz Klopfer, *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen*, Bauverlag, Wiesbaden, Berlin 1974.

Klopfer/Homann 2008

Heinz Klopfer, Martin Homann, *Feuchte*, in: Lehrbuch der Bauphysik. Heinz-Martin Fischer, Hanns Freymuth, Peter Häupl, Martin Homann, Richard Jenisch, Ekkehard Richter, Martin Stohrer (Hrsg.), 6. überarbeitete Auflage, Vieweg und Teubner, Wiesbaden 2008, S. 339—489.

Knecht 2009

Lena Knecht, *Jute als textiler Bildträger-Untersuchungen zu deren Alterung*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Studiengang Konservierung und Restaurierung von Gemälden und gefassten Skulpturen, 2009.

Koch 1955

P.-A. Koch, *Faserstoffe*, in: Landolt-Börnstein-Zahlenwerte und Funktionen aus Physik, Chemie, Astronomie, Geophysik und Technik, Band IV, Teil 1. Ernst Schmidt (Hrsg.), 6. Aufl., Springer Verlag, Berlin 1955.

Koller 1984

Manfred Koller, *Das Staffeleibild der Neuzeit*, in: Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken Band 1: Farbmittel, Buchmalerei, Tafel- und Leinwandmalerei. Hermann Kühn, Heinz Roosen-Runge, Rolf E. Straub, Manfred Koller (Hrsg.), Philipp Reclam jun., Stuttgart 1984, S. 261—434.

Kölln 2004

Klaas Kölln, *Morphologie und mechanische Eigenschaften von Zellulosefasern: Untersuchungen mit Röntgen- und Neutronenstreuung*, Dissertation, Christian-Albrechts-Universität Kiel, 2004.

Konietzny 2012

Mona Konietzny, *Erste Studien zur Stabilisierung der kupferfraßgeschädigten textilen Wandbespannungen des Herrenhauses Ermlitz mittels Polyestervlies-Mistlining*, unveröffentlichte Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2012.

Kopczyński/Wlochowicz 1966

Janusz Kopczyński, Andrzej Wlochowicz, *Alterations of some parameters of the submicroscopic structure of flax fibers during their primary processing*, Textile Research Journal **36** 1966, S. 967—970.

Kowalewsky 1929

Kowalewsky, *Wassergehalt der Wolle im Verhältnis zur Feuchtigkeit und Temperatur der Luft*, Melliand Textilberichte **10** 1929, S. 782—784.

Krässig 1993

Hans A. Krässig, *Cellulose: structure, accessibility, and reactivity*, Gordon and Breach, Yverdon, 1993.

Krause/Schempp 1991

Thomas Krause, W. Schempp, *Chemische Prüfung von Zellstoff*, in: Chemische und mikrobiologische Verfahren. Thomas Krause (Hrsg.), [=Prüfung von Papier, Pappe, Zellstoff und Holzstoff Band 1, Werner Franke (Hrsg.)], Springer Verlag, Berlin 1991, S. 1—64.

Kronkright 1990

Dale Paul Kronkright, *Deterioration of artifacts made from plant materials*, in: The conservation of artifacts made from plant materials. Dake Paul Kronkright, Mary-Lou Florian, Ruth Norton (Hrsg.), The J. Paul Getty Trust, Los Angeles 1990, S. 139—187.

Krzemien et al. 2016

Leszek Krzemien, Michal Lukomski, Lukasz Bratasz, Roman Kozlowski, F. Marion Mecklenburg, *Mechanism od craquelure pattern formation on panel paintings*, Studies in Conservation **61** (6) 2016, S. 324—330.

Kupfer 1997

Klaus Kupfer, *Grundlagen der Feuchtemessung*, in: Materialfeuchtemessung: Grundlagen, Meßverfahren, Applikationen, Normen. Klaus Kupfer (Hrsg.), [=Kontakt & Studium Band 513], Expert Verlag, Renningen-Malmsheim 1997, S. 1—24.

Kuzmitch 1978

L. A. Kuzmitch, *A new method of investigating stressed state of artistic works in restoration and conservation practice*, in: ICOM Committee for Conservation 5th triennial meeting preprints, Zagreb 1—8 October 1978. ICOM Committee for Conservation (Hrsg.), International Council of Museums, Paris 1978, S. 78/1/10/1—78/1/10/6.

Langner 2012

Marina Langner, *Konservierung und Restaurierung des Leinwandgemäldes Maximilian I. Joseph, König von Bayern (1756-1825) aus dem Mainfränkischen Museum Würzburg*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2012.

Lascaux 2017

Firma Lascaux. Produktinformationen für Heiss-Siegelkleber 375. Zugriff 10.06.2017,
http://lascaux.ch/pdf/de/produkte/restauro/58370_01_Kleber_und_Klebewachse.pdf.

Läuchli 2004

Matthias Läuchli, *Gemäldestrukturen unter permanenter Zugbelastung - Gewichtsbedingte Deformationen an grossformatigen, modernen Gemälden*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Hochschule der Künste Bern, Fachbereich Konservierung und Restaurierung, 2004.

Lee et al. 1989

S. B. Lee, John Bogaard, R.L. Feller, *Damaging effects of visible and near-ultraviolet radiation on paper*, in: Historic textile and paper materials II: conservation and characterization. S. Haig Zeronian, Howard L. Needles (Hrsg.), [=ACS Symposium Series Bd. 410], American Chemical Society, Washington 1989, S. 54—62.

Leene et al. 1975

Jentina E. Leene, L. Demény, R. J. Elema, A. J. de Graaf, J. J. Surtel, *Artificial ageing of yarns in presence as well as in absence of light and under different atmospheric conditions*, in: ICOM Committee for Conservation 4th triennial meeting preprints, Venice, 13—18 October 1975. ICOM Committee for Conservation (Hrsg.), International Council of Museums, Paris 1975, S. 75/10/2-1—75/10/2-11.

Lichtblau et al. 2009

Dirk Lichtblau, Sebastian Dobrusskin, Agnes Blüher. *Das SurveNIR-System zur Bewertung des Zustands und des Alterungsverhaltens von Papier.* Bericht über das Forschungsseminar und den Workshop 8.—10. September 2009, Bern.

Lindner 2012

Anja Lindner, *Untersuchungen zur pH-Wert-Bestimmung an Flachsfasern mittels chemischer Sensoren*, unveröffentlichte Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2012.

Lipinski 2006

Wolff Lipinski, *Möglichkeiten der schriftlichen, grafischen und fotografischen Dokumentation von Gewebstrukturen im Gemäldebereich*, unveröffentlichte Seminararbeit, Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Studiengang Konservierung und Restaurierung von Gemälden und gefassten Skulpturen, 2006.

Lipinski 2010

Wolff-Hartwig Lipinski, *Untersuchungen zum feuchtephysikalischen Verhalten von Gemälden auf textilem Bildträger unter biaxialer Dehnung*, Siegls Fachbuchverlag, München, 2010 [= Schriftenreihe des Instituts für Museumskunde an der Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Band 26].

Lück 1964

Winfried Lück, *Feuchtigkeit: Grundlagen, Messen, Regeln*, Oldenbourg, München 1964.

MacBeth et al. 1993

Rhona MacBeth, Marianne Odlyha, Aviva Burnstock, Caroline Villers, Robert Bruce-Gardner, *Evaluation of moisture treatment of fabric-supported paintings*, in: ICOM Committee for Conservation 10th triennial meeting preprints, Washington DC, 22—27 August 1993. ICOM Committee for Conservaiton (Hrsg.), James & James, London 1993, S. 150—156.

Mager 2007

Simone Mager, *Leinwand ohne Spannrahmen in der zeitgenössischen Kunst-Bildträger mit besonderen Eigenschaften und Anforderungen*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft, 2007.

Malek et al. 2016

Mokrane Malek, Haithem Khelfa, Pascal Picart, Denis Mounier, Christophe Polâne, *Microtomography imaging of an isolated plant fiber: a digital holographic approach*, Applied Optics **55** (3) 2016, S. A111—A121.

Mally 1995

Annerose Mally, *Die Kombinationsfähigkeit von Textilmaterialien bei der nähtechnischen Restaurierung eines Gobelins*, Arbeitsblätter für Restauratoren **28** (2) 1995, S. 211—223.

Mannes et al. 2014

D. Mannes, S. Sanabria, M. Funk, R. Wimmer, K. Kranitz, P. Niemz, *Water vapour diffusion through historically relevant glutin-based wood adhesives with sorption measurements and neutron radiography*, Wood Science and Technology **48** (3) 2014, S. 591—609.

Marperger 1710

Paul Jacob Marperger, *Ausführliche Beschreibung des Hanff und Flachs und der daraus verfertigten Manufacturen, sonderlich des Zwirns, der Leinwand und Spitzen, was in solchen vor ein grosser Handel durch alle Welts-Theile getrieben und wie viel tausend Personen dadurch ernehret werden*, Leipzig 1710.

Marsh 1948

J. T. Marsh, *An introduction to Textile Finishing*, Chapman & Hall, London 1948.

Mecheels et al. 2009

Stefan Mecheels, Herbert Vogler, Josef Kurz, *Kultur- und Industriegeschichte der Textilien*, Wachter, Bönnigheim 2009.

Mecklenburg 1982

Marion F. Mecklenburg, *Some aspects of the mechanical behavior of fabric supported paintings*, 1982 [=unveröffentlichtes Manuskript, zugänglich in der ICCROM Bibliothek Rom].

Mecklenburg 2005

Marion F. Mecklenburg, *The structure of canvas supported paintings*, in: Preprints International conference on painting conservation. Canvases: behaviour, deterioration and treatment. 9—11 March 2005. María Castell Agustí, Laura Fuster López, Susanna Martín Rey, Vicente Guerola Blay (Hrsg.), Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2005, S. 119—155.

Mecklenburg 2007

Marion F. Mecklenburg, *Microclimates and moisture induced damage to paintings*, in: Museum microclimates, Contributions to the conference in Copenhagen 19—23 November 2007. Timothy Padfield, Karen Borchersen (Hrsg.), National Museum of Denmark, 2007, S. 19—25.

Mecklenburg/Tumosa 1991a

Marion F. Mecklenburg, Charles S. Tumosa, *An introduction into the mechanical behavior of paintings under rapid loading conditions*, in: Art in Transit: Studies in the transport of paintings. Marion F. Mecklenburg (Hrsg.), National Gallery of Art, Washington 1991, S. 137—170.

Mecklenburg/Tumosa 1991b

Marion F. Mecklenburg, Charles S. Tumosa, *Mechanical behaviour of paintings subjected to changes in temperature and relative humidity*, in: Art in Transit: Studies in the transport of paintings. Marion F. Mecklenburg (Hrsg.), National Gallery of Art, Washington 1991, S. 173—216.

Michalski 1991

Stefan Michalski, *Paintings: Their response to temperature, relative humidity, shock, and vibration*, in: Art in Transit: Studies in the transport of paintings. Marion F. Mecklenburg (Hrsg.), National Gallery of Art, Washington 1991, S. 223—248.

Michalski 2013

Stefan Michalski, *Stuffing everything we know about mechanical properties into one collection simulation*, in: Climate for collections. Standards and uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference, 7—9 November 2012. Jonathan Ashley-Smith, Andreas Burmester, Melanie Eibl (Hrsg.), Archetype Publications, London 2013, S. 349—361.

Moore et al. 1950

Anna T. Moore, Lorraine W. Scott, Ines V. deGruy, Mary L. Rollins, *The swelling of cotton in water: a microscopical study*, Textile Research Journal **20** (9) 1950, S. 620—630.

Morehead 1947

Frederick F. Morehead, *Some comparative data on the cross-sectional swelling of textile fibers*, Textile Research Journal **17** 1947, S. 96—98.

Morton/Hearle 1993

William E. Morton, John W. S. Hearle, *Physical properties of textile fibres*, 3. Aufl., The Textile Institute, Bath 1993.

Müller 1882

Ernst Müller, *Über den Wassergehalt der Faserstoffe in seiner Abhängigkeit von dem Feuchtigkeitsgehalte der Atmosphäre*, Der Civilingenieur **29** 1882, S. 157—166.

Müller 1920

Ernst Müller, *Über den Wassergehalt der Faserstoffe in seiner Abhängigkeit von dem Feuchtigkeitsgehalt der Atmosphäre*, Textile Forschung **2** (1) 1920, S. 1—8.

Mwaikambon/Ansell 2002

Leonard Y. Mwaikambon, Martin P. Ansell, *Chemical modification of hemp, sisal, jute, and kapok fibers by alkalization*, Journal of Applied Polymer Science **84** 2002, S. 2222—2234.

Nelson/O'Connor 1964

Mary N. Nelson, Robert T. O'Connor, *Relation of certain Infrared bands to cellulose crystallinity and crystal lattice type. Part II. A new infrared ratio for estimation of crystallinity in celluloses I and II*, Journal of Applied Polymer Science **8** 1964, S. 1325—1341.

Neue et al. 1997

J. Neue, M. Krus, Klaus Kupfer, *Hygrometrische Verfahren*, in: Materialfeuchtemessung: Grundlagen, Meßverfahren, Applikationen, Normen. Klaus Kupfer (Hrsg.), [=Kontakt & Studium Band 513], Expert Verlag, Renningen-Malmsheim 1997, S. 235—245.

Neufert 2006

Hendrikje Neufert, *Untersuchungen zum Dehnverhalten von Leinwand in Bezug zur Position im Bildträger - Versuche mit unbehandeltem, gedehntem und degradiertem Flachsgewebe*, unveröffentlichte Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2006.

Nickerson 1954

Ralph F. Nickerson, *Cotton fiber: physical properties*, in: Matthews' Textile Fibers. Herbert R. Mauersberger (Hrsg.), Wiley, New York 1954, S. 183—218.

Nodder/Kinkead 1923

C. R. Nodder, R. W. Kinkead, *The behaviour of bast fibres under the influence of caustic alkalies*, Journal of the Textile Institute **14** (6) 1923, S. T133—T156.

NORM DIN 51562-1

DIN 51562-1:1999-01, Viskosimetrie: Messung der kinematischen Viskosität mit dem Ubbelohde-Viskosimeter, Teil 1: Bauform und Durchführung der Messung.

NORM DIN 53124

DIN 53124:1998-08, Papier, Pappe und Zellstoff: Bestimmung des pH-Wertes in wäßrigen Extrakten.

NORM DIN 53896

DIN 53896:1985-12, Prüfung von Textilien: Künstliche Alterung durch erhöhte Temperatur in Luft oder Sauerstoff.

NORM DIN 54270-1

DIN 54270-1:1976-09, Prüfung von Textilien: Bestimmung der Grenzviskosität von Cellulosen, Grundlagen.

NORM DIN 54270-3

DIN 54270-3:1977-08, Prüfung von Textilien: Bestimmung der Grenzviskosität von Cellulosen, EWNN-Verfahren.

NORM DIN 61101-1

DIN 61101-1:1979-01, Gewebebindungen, Allgemeine Begriffe, Grundbindungen.

NORM DIN 66138

DIN 66138:2008-09, Isotherme Messung der Sorption von Dämpfen an Feststoffen.

NORM DIN EN ISO 105-B02

DIN EN ISO 105-B02:2014-11, Textilien: Farbechtheitsprüfungen, Teil B02: Farbechtheit gegen künstliches Licht: Xenonbogenlicht (ISO 105-B02:2014).

NORM DIN EN ISO 1833-1

DIN EN ISO 1833-1:2011-01, Textilien-Quantitative chemische Analysen-Teil 1: Allgemeine Grundlagen der Prüfung (ISO 1833-1:2006).

NORM DIN EN ISO 2062

DIN EN ISO 2062:2010-04, Textilien: Garne von Aufmachungseinheiten-Bestimmung der Höchstzugkraft und Höchstzugkraftdehnung von Garnabschnitten unter Verwendung eines Prüfgeräts mit konstanter Verformungsgeschwindigkeit.

NORM DIN EN ISO 3071

DIN EN ISO 3071:2006-05, Textilien-Bestimmung des pH des wässrigen Extraktes (ISO 3071:2005).

NORM DIN EN ISO 12571

DIN EN ISO 12571:2000-04, Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten, Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften (ISO 12571:2000).

NORM DIN EN ISO 13934-1

DIN EN ISO 13934-1:1999-04, Textilien-Zugeigenschaften von textilen Flächengebilden-Teil 1: Bestimmung der Höchstzugkraft und der Höchstzugkraft-Dehnung mit dem Streifen-Zugversuch (ISO 13934-1:1999).

Odlyha et al. 1995

Marianne Odlyha, T. Y. Amy Chan, O. Pages, *Evaluation of relative humidity effects on fabric-supported paintings by dynamic mechanical and dielectric analysis*, Thermochimica Acta **263** 1995, S. 7—21.

Odlyha et al. 1996

Marianne Odlyha, G. Foster, Mikkel Scharff, *Non-invasive evaluation of moisture sorption and desorption processes in canvases*, in: ICOM Committee for Conservation 11th triennial meeting preprints, Edinburgh, 1—6 September 1996. Janet Bridgland (Hrsg.), James & James, London 1996, S. 297—302.

Opitz 1940

Hans Opitz, *Faserkunde*, Franckh'sche Verlagshandlung, Stuttgart 1940.

Oriola et al. 2011

Marta Oriola, Gema Campo, Matija Strlič, Linda Cséfalvayová, Marianne Odlyha, Alenka Možir, *Non-destructive condition assessment of painting canvases using near infrared spectroscopy*, in: ICOM Committee for Conservation 16th triennial conference preprints, Lisbon, 19—23 September 2011. Janet Bridgland (Hrsg.), Critério-Produção Gráfica, Lisbon 2011, Digitalausgabe ohne Seitenangabe.

Oriola et al. 2014

Marta Oriola, Alenka Možir, Paul Garside, Gema Campo, Anna Nualart-Torroja, Irene Civil, Marianne Odlyha, May Cassar, Matija Strlič, *Looking beneath Dali's paint: non-destructive canvas analysis*, Analytical Methods **6** (1) 2014, S. 86—96.

Outhwaite 1993

Sally Outhwaite, *An investigation into the properties of sized linen canvas*, AICCM bulletin **18** (3-4) 1993, S. 45—53.

Padfield 1969

Timothy Padfield, *The deterioration of cellulose: a literature review: the effects of exposure to light, ultra-violet and high energy radiation*, in: Problems of conservation in museums: a selection of papers presented to the joint meeting of the ICOM Committee for Museum Laboratories and the ICOM Committee for the Care of Paintings, held in Washington and New York, from September 17 to 25, 1965. International Council of Museums, Paris 1969, S. 119—164.

Park et al. 2010

Sunkyu Park, John O. Baker, Michael E. Himmel, Philip A. Parilla, David K. Johnson, *Cellulose crystallinity index: measurement techniques and their impact on interpreting cellulase performance*, Biotechnology for Biofuels **3** 2010, ohne Seitenangabe.

Peirce 1937

Frederick Thomas Peirce, *The geometry of cloth structure*, Journal of the Textile Institute **27** 1937, S. T45—T96.

Porck 2000

Henk J. Porck, *Rate of paper degradation: The predictive value of artificial aging tests*, European Commission on Preservation and Access (Hrsg.), Amsterdam 2000.

Portsteffen/Heckenbrücker 2008

Hans Portsteffen, Anne Heckenbrücker, *Johan Barthold Jongkind-In der Umgebung von Nevers, Kurzbericht zu Maltechnik und Zustand*, Forschungsprojekt Maltechnik des Impressionismus und Postimpressionismus, Köln, 2008 Online-Publikation www.museenkoeln.de/impressionismus.

Preston 1946

J. M. Preston, *A method for measuring the transverse swlling of fibres*, Transactions of the Faraday Society **42** 1946, S. B131—B136.

Preston/Nimkar 1949

J. M. Preston, M. V. Nimkar, *Measuring the swelling of fibres in water*, Journal of the Textile Institute Proceedings **40** (7) 1949, S. P674—P688.

Princi et al. 2005

Elisabetta Princi, Silvia Vicini, E. Pedemonte, Valeria Arrighi, I. McEwen, *Thermal characterisation of cellulose based materials. Investigation of water content*, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry **80** 2005, S. 369–373.

Quirijns et al. 2005

Elisabeth J. Quirijns, Anton J. B. van Boxtel, Wilko K. P. van Loon, Gerrit van Straten, *Sorption isotherms, GAB parameters and isosteric heat of sorption*, Journal of the Science of Food and Agriculture **85** (11) 2005, S. 1805—1814.

Reuber 2010

Lena Reuber, *Klebstoffe für die Rissverklebung an Leinengeweben*, Köln, 2010 [= Kölner Beiträge zur Restaurierung und Konservierung von Kunst- und Kulturgut. Digitale Edition]

Reumann 2000a

Ralf Dieter Reumann, *Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik*, Springer Verlag, Berlin 2000.

Reumann 2000b

Ralf-Dieter Reumann, *Faserzugdeformationsverhalten*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 180—190.

Reumann 2000c

Ralf-Dieter Reumann, *Geometrische Merkmale*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 379—390.

Reumann 2000d

Ralf-Dieter Reumann, *Konstruktionsmerkmale*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 391—403.

Reumann 2000e

Ralf-Dieter Reumann, *Mechanisches Formänderungsverhalten textiler Materialien*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 57—125.

Reumann 2000f

Ralf-Dieter Reumann, *Verhalten gegenüber Zugbeanspruchung*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 403—433.

Richter-Kroschewski 2001

Dietrich Richter-Kroschewski, *Konservierung und Restaurierung von zwei Leinwandgemälden aus einem sechsteiligen Gemäldezyklus "Amor und Psyche" von Adolph Thomas, um 1873*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2001.

Rizzo/Burnstock 2003

Adriana Rizzo, Aviva Burnstock, *A review of the effectiveness and the effect of de-acidification of linen, cotton and flax canvas after 17 year of natural aging*, in: Alternatives to lining. The structural treatment of paintings on canvas without lining, Preprints of the conference held by the British Association of Patinings Conservator-Restorers and the United Kingdom Institute for Conservation Paintings Section, 19 September 2003. Mary Bustin, Tom Caley (Hrsg.), United Kingdom Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London 2003, S. 49—53.

Roche 2005

Alain Roche, *Comportement mécanique des peintures sur toile: Evaluation de la stabilité mécanique aux variations d'humidité et de température*, in: Preprints International conference on painting conservation. Canvases: behaviour, deterioration and treatment. 9—11 March 2005. María Castell Agustí, Laura Fuster López, Susanna Martín Rey, Vicente Guerola Blay (Hrsg.), Universidad Politécnica de Valencia, Valencia 2005, S. 189—212.

Röder et al. 2006

Thomas Röder, Johann Moosbauer, Mario Fasching, Andreas Bohn, Hans-Peter Fink, Thomas Baldinger, Herbert Sixta, *Crystallinity determination of native cellulose: Comparison of analytical methods*, Lenzinger Berichte **86** 2006, S. 85—89.

Roffael/Schaller 1971

Edmone Roffael, Konrad Schaller, *Einfluß thermischer Behandlung auf Cellulose*, Holz als Roh- und Werkstoff **29** (7) 1971, S. 275—278.

Rohde/Lichtblau 2013

Mandy Rohde, Dirk Lichtblau, *Papier mittels Nahinfrarot zerstörungsfrei untersuchen. Wissenschaftliche Gutachten mit dem SurveNIR-System*, Restauro **121** (2) 2013, S. 44—48.

Römpp 2016

Römpp Lexikon Online, Thieme, Stuttgart 2016.

Rothamel 2000

Ursula Rothamel, *Alterungsprozesse von Textilfasern: eine Standortbestimmung*, Arbeitsblätter für Restauratoren **33** (2, Gruppe 10) 2000, S. 285—292.

Rouba 1992

J. Bogumila Rouba, *Die Leinwandstrukturanalyse und ihre Anwendung für die Gemäldekonservierung*, Restauratorenblätter **13** 1992, S. 79—90.

Russell/Berger 1982

William H. Russell, Gustav Berger, *The behavior of canvas as a structural support for painting*, in: Science and technology in the service of conservation, Preprints of the contributions to the Washington Congress, 3—9 September 1982. N. S. Brommelle, Garry Thomson (Hrsg.), The International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London 1982, S. 139—145.

Sandy et al. 2010

Mark Sandy, Andrew Manning, Fabrice Bollet, *Changes in the crystallinity of cellulose in response to changes in relative humidity and acid treatment*, Restaurator **31** (1) 2010, S. 1—18.

Sanio 1995

Claudia Sanio, *Zur Mikrobiologie der Flachsröste: Bakteriologische, biochemische und technologische Untersuchungen*, Dissertation, Universität Münster, 1995.

Satlow 1951

Günther Satlow, *Trocknung von Leinengarnen. Trocknungsvorgänge an Strähnen und Einfluß auf die Festigkeit von Einzelfäden*, Das Deutsche Textilgewerbe **53** 1951, S. 625—627.

Saverwyns et al. 2002

Steven Saverwyns, Valérie Sizaire, Jan Wouters, *The acidity of paper: evaluation of methods to measure the pH of paper samples*, in: ICOM Committee for Conservation 13th triennial meeting preprints, Rio de Janeiro, 22—27 September 2002. Roy Vontobel (Hrsg.), James & James, London 2002, S. 628—634.

Schaible 1987

Volker Schaible, *Neue Überlegung zur Feuchtigkeit am Leinwandbild*, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung **1** (1) 1987, S. 75—94.

Schaible 1989

Volker Schaible. (1989). *Vom Atmen der Bilder* (Video). Zugriff 21.06.2017, https://www.restauratoren.de/das-atmen-der-bilder-video/.

Schaible 1990

Volker Schaible, *Überlegungen zum Phänomen der Schüsselbildung an Leinwandgemälden*, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung **4** (2) 1990, S. 235—250.

Schaposchnikoff 1928

W. G. Schaposchnikoff, *Über die Feuchtigkeit der Textilrohstoffe*, Melliand Textilberichte **9** 1928, S. 844—850.

Scheel 1992

Elisabeth Scheel, *Der textile Bildträger*, in: Malerei und Textil. Manfred Koller, Rainer Prandtstetten (Hrsg.), [=Restauratorenblätter 13], Mayer & Comp., Klosterneuburg 1992, S. 69—77.

Scheithauer 1941

Georg Scheithauer, *Über die Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe der Leinengarne*, Die Bastfaser **1** (5) 1941, S. 65—72.

Schellmann 2007

Nanke C. Schellmann, *Animal glues: a review of their key properties relevant to conservation*, Reviews in Conservation **8** 2007, S. 55—66.

Schenek 2000

Anton Schenek, *Naturfaser-Lexikon*, Deutscher Fachverlag, Frankfurt a. M. 2000.

Schilling 1930a

Ernst Schilling, *Botanik und Kultur des Flachses*, in: Der Flachs: 1. Botanik, Kultur, Aufbereitung, Bleicherei und Wirtschaft des Flachses. W. Kind, P. Koenig, W. Müller, E. Schilling, C. Steinbrinck (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 1930, S. 49—207.

Schilling 1930b

Ernst Schilling, *Worauf beruht der verschiedene Feuchtigkeitsgehalt der Flachsgarne*, Der Deutsche Leinenindustrielle **48** 1930, S. 275—276.

Schmidt 2011

Lydia Schmidt, *Die Restaurierung einer Grisaillemalerei (17./18. Jh., Klassik Stiftung Weimar) auf Netzleinwand. Unter besonderer Berücksichtigung der Bildträgerkonservierung*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang für Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2011.

Schrei 2003

Martina Schrei, *Physikalisches Verhalten von Flachsgewebe in Abhängigkeit von Feuchtezuschlag und Temperatur*, unveröffentlichte Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2003.

Schroth 1995

Tilmann Schroth, *Untersuchungen zur Weiterentwicklung der Flachsröste*, Dissertation, Universität Hohenheim, Agrarwissenschaften, 1995.

Schulz/Marx 1954

G. V. Schulz, M. Marx, *Über Molekulargewichte und Molekulargewichtsverteilungen nativer Cellulosen*, Die Makromolekulare Chemie **14** (1) 1954, S. 52—95.

Scicolone et al. 1996

Giovanna Scicolone, Elena Rossi, Antonio Sardella, Alberto Seves, Giovanni Testa, *Kinetics of cellulose fiber degradation and correlation with some tensile properties to plan consolidation or lining interventions*, in: ICOM Committee for Conservation 11th triennial meeting preprints, Edinburgh, 1—6 September 1996. Janet Bridgland (Hrsg.), James & James, London 1996, S. 310—315.

Selli et al. 1998

Elena Selli, Pier Luigi Beltrame, Giovanni Testa, Anna Maria Bonfatti, Elena Rossi, Alberto Seves, *Kinetic studies on the accelerated aging of cellulosic materials*, Die Angewandte Makromolekulare Chemie **257** (4499) 1998, S. 63—69.

Seves et al. 2000

A. M. Seves, Silvio Sora, Giovanna Scicolone, Giovanni Testa, Anna Maria Bonfatti, Elena Rossi, A. Seves, *Effect of thermal accelerated ageing on the properties of model canvas paintings*, Journal of Cultural Heritage **1** (3) 2000, S. 315—322.

Shahani et al. 1989

Chandru J. Shahani, Frank H. Hengemihle, Norman Weberg, *The effect of variations in relative humidity on the accelerated aging of paper*, in: Historic textile and paper materials II: conservation and characterization. S. Haig Zeronian, Howard L. Needles (Hrsg.), [=ACS Symposium Series Bd. 410], American Chemical Society, Washington 1989, S. 63—80.

Smith 1991

Anthony W. Smith, *Cellulose: in paper and textiles*, in: Paper and textiles: the common ground. Preprints of the conference held at the Burrell Collection, Glasgow, 19—20 September 1991. Fiona Butterfield, Linda Eaton (Hrsg.), The Scottish Society for Conservation & Restoration, Edinburgh 1991, S. 1—17.

Sommer 1956

Herbert Sommer, *Eigenschaftsänderungen der Textilien durch Umwelteinflüsse*, Faserforschung und Textiltechnik **7** (1) 1956, S. 1—13.

Sommer 1960

Herbert Sommer, *Die Prüfung von Textilien*, Springer Verlag, Berlin, 1960

[= Handbuch der Werkstoffprüfung Band 5].

Staudinger/Feuerstein 1936

H. Staudinger, K. Feuerstein, *Über hochpolymere Verbindungen. 147. Mitteilung. Über den Polymerisationsgrad natürlicher und technischer Cellulosen*, Justus Liebigs Annalen der Chemie **526** (1) 1936, S. 72—102.

Stöckigt 1990

Ulrich Stöckigt, *Appretur: Vorappretur, Bleichen, Trocknen, mechanische und chemische Appretur*, Fachbuchverlag, Leipzig 1990.

Stokes 2008

Debbie J. Stokes, *Principles and practice of variable pressure/environmental scanning electron microscopy (VP-ESEM)*, John Wiley & Sons, Chichester 2008.

Stoll/Fengel 1981

Manfred Stoll, Dietrich Fengel, *Untersuchungen über die Alterung von Cellulose anhand von altägyptischen Leinenproben*, Das Papier **35** (5) 1981, S. 178—185.

Stoll/Fengel 1982

Manfred Stoll, Dietrich Fengel, *Vergleichende Untersuchungen zur Viskositätsbestimmung von Cellulosen sehr unterschiedlichen Polymerisationsgrades*, Das Papier **36** (3) 1982, S. 111—117.

Stoll/Fengel 1988

Manfred Stoll, Dietrich Fengel, *Chemical and structural studies on ancient Egyptian linen*, Berliner Beiträge zur Archäometrie **10** 1988, S. 151—172.

Stolow 1987

Nathan Stolow, *Conservation and exhibitions: packing, transport and environmental considerations*, Butterworth, London, 1987 Butterworth series in conservation and museology.

Stols-Witlox 2014

Maartje Stols-Witlox, *Historical recipes for preparatory layers for oil paintings in manuals, manuscripts and handbooks in North West Europe, 1550-1900: analysis and reconstructions*, Dissertation, Universiteit van Amsterdam, 2014.

Straub 1965

R. E. Straub, *Erhaltungsmaßnahmen am Leinwandbild*, Nachrichtenblatt der Denkmalpflege **8** (3) 1965, S. 72—74.

TAPPI T231 cm 07

T231 cm 07:2007, Zero-span breaking strength of pulp (dry zero-span tensile) Hrsg: Technical Association of the Pulp and Paper Industry.

Textillexikon 1965

Paul-August Koch, Günther Satlow, *Großes Textillexikon*, Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart 1965.

Thieme-Hess 1999

Isabella Thieme-Hess, *Risszusammenführung und Festigung grossflächiger Malschichtstauchungen an einem Leinwandgemälde*, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung **13** (1) 1999, S. 55—62.

Thomas/Reumann 2000a

Hartwig Thomas, Ralf-Dieter Reumann, *Drehung*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 264—274.

Thomas/Reumann 2000b

Hartwig Thomas, Ralf-Dieter Reumann, *Feinheit*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 250—259.

Thomas/Reumann 2000c

Hartwig Thomas, Ralf-Dieter Reumann, *Festigkeits- und Dehnungsverhalten*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 274—585.

Thomas et al. 2000

Hartwig Thomas, Ralf-Dieter Reumann, Jens-Holm Dittrich, *Verhalten gegenüber Feuchte- oder Wassereinwirkung*, in: Prüfverfahren in der Textil- und Bekleidungstechnik. Ralf-Dieter Reumann (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 2000, S. 537—550.

Thomson 1978

Garry Thomson, *The Museum Environment*, Butterworth in association with the International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London, 1978 [= Conservation in the arts, archaeology and architecture].

Thomson 1986

Garry Thomson, *The Museum Environment*, 2. Auflg., Butterworth-Heinemann, London 1986.

Tímár-Balázsy 1999

Ágnes Tímár-Balázsy, *Drying behaviour of fibres*, in: ICOM Committee for Conservation 12th triennial meeting preprints, Lyon, 29 August—3 September 1999. Janet Bridgland (Hrsg.), James & James, London 1999, S. 661—666.

Tímár-Balázsy/Eastop 1998

Ágnes Tímár-Balázsy, Dinah Eastop, *Chemical principles of textile conservation*, Butterworth-Heinemann, Oxford 1998.

Timmermann et al. 2001

Ernesto O. Timmermann, J. Chirife, H. A. Iglesias, *Water sorption isotherms of foods and foodstuffs: BET or GAB parameters?*, Journal of Food Engineering **48** 2001, S. 19—31.

Tost 2005

Kristina Tost, *Versuche zum Dehnungsverhalten gealteter Leinwand am Beispiel einer künstlich gealterten, mittelschweren Flachsleinwand*, unveröffentlichte Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, Studiengang Kunsttechnologie, Konservierung und Restaurierung von Kunst- und Kulturgut, 2005.

Treiber 1955

E. Treiber, *Morphologische Strukturen bei natürlichen Fasern*, in: Die Physik der Hochpolymere. Dritter Band: Ordnungszustände und Umwandlungserscheinungen in festen hochpolymeren Stoffen. H. A. Stuart (Hrsg.), Springer Verlag, Berlin 1955, S. 369—413.

Treiber 1957

Erich Treiber, *Die Chemie der Pflanzenzellwand*, Springer Verlag, Berlin 1957.

Turner 1949

A. J. Turner, *The structure of textile fibres. VIII-The long vegetable fibres*, Journal of the Textile Institute Porceedings **40** (10) 1949, S. P972—P984.

Ullmanns 1953

Wilhelm Foerst, *Ullmanns Encyklopädie der technischen Chemie, 4. Band*, Urban & Schwarzenberg, München 1953.

Urquhart 1960

Alexander Robert Urquhart, *Sorption isotherms*, in: Moisture in Textiles. J. W. S. Hearle, R. H. Peters (Hrsg.), Butterworth, London 1960, S. 14—32.

Valkó 1937

Emmerich Valkó, *Kolloidchemische Grundlagen der Textilveredlung*, Julius Springer, Berlin 1937.

Vanderlip de Carbonnel 1980

Katrina Vanderlip de Carbonnel, *A Study of French Painting Canvases*, Journal of the American Institue for Conservation **20** (1) 1980, S. 3—20.

von Reden et al. 2015

Anna von Reden, Dirk Andreas Lichtblau, Jens Danneberg, Ursula Haller, *A technical note on the determination of moisture regain of canvas painting supports using near-infraread spectroscopy (NIRS)*, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung **29** (1) 2015, S. 141—148.

Vuori/Tse 2004

Jan Vuori, Season Tse, *A preliminary study of a micro extraction method for measuring the pH of textiles*, ICOM CC Newsletter Working Group Textiles (19) 2004, S. 4—15.

Ward 1946

Kyle Ward, *Occurrence of cellulose*, in: Cellulose and Cellulose Derivatives. Emil Ott (Hrsg.), [=High Polymers Vol. V], 2. Ed., Interscience Publishers, New York 1946, S. 5—25.

Wehlte 1958

Kurt Wehlte, *Altholländische Spannmethode für Gewebe*, Maltechnik **64** (2) 1958, S. 38—42.

Wehlte 1967

Kurt Wehlte, *Werkstoffe und Techniken der Malerei*, Otto Maier Verlag, Ravensburg 1967.

Welo et al. 1952a

Lars A. Welo, Hilda M. Ziifle, Leopold Loeb, *Swelling capacities of fibers in water: Part I: Desiccation rate measurements*, Textile Research Journal **22** 1952, S. 254—261.

Welo et al. 1952b

Lars A. Welo, Hilda M. Ziifle, Allan W. Mcdonald, *Swelling capacities of fibers in water: Part II: Centrifuge studies*, Textile Research Journal **22** 1952, S. 261—273.

Wessel 2000

Birgit Wessel, *Baumwollgewebe als Bildträger*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Fachhochschule Köln, Fachbereich Restaurierung und Konservierung von Kunst- und Kulturgut, 2000.

Whitmore 2015

Paul M. Whitmore, *Einfluss des Wassers auf die Papieralterung*, in: Papier und Wasser: Ein Lehrbuch für Restauratoren, Konservierungswissenschaftler und Papiermacher. Gerhard Banik, Irene Brückle (Hrsg.), Siegl, München 2015, S. 237—273.

Witlox/Carlyle 2005

Maartje Witlox, Leslie Carlyle, *"A perfect ground is the very soul of the art" (Kingston 1835): ground recipes for oil painting, 1600—1900*, in: ICOM Committee for Conservation 14th triennial meeting preprints, The Hague, 12—16 September 2005. Isabelle Verger (Hrsg.), Earthscan, London 2005, S. 519—528.

Worch 1996

Maria Theresia Worch, *Naturwissenschaftliche Grundlagenforschung für die Textilrestaurierung mit ihren möglichen Konsequenzen für zukünftige Konservierungen*, in: Spannungsfeld Restaurierung. Jubiläumsschrift zum 40jährigen Bestehen der AdR. Arbeitsgemeinschaft der Restauratoren (Hrsg.), [= AdR-Schriftenreihe zur Restaurierung und Grabungstechnik Heft 2], 1996, S. 127—132.

Wufka 2004

Susanne Wufka, *Faserbestimmung an textilen Bildträgern*, unveröffentlichte Diplomarbeit, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart, Studiengang Konservierung und Restaurierung von Gemälden und gefassten Holzskulpturen, 2004.

Wülfert 1999

Stefan Wülfert, *Der Blick ins Bild: Lichtmikroskopische Methoden*, Ravensburger Buchverlag, Ravensburg, 1999 [= Bücherei des Restaurators Band 4, Hrsg. Ulrich Schießl].

Wüstenberg 2015

Tanja Wüstenberg, *Cellulose and cellulose derivatives in the food industry*, Wiley-Vch, Weinheim 2015.

Wyeth 2005

Paul Wyeth, *Signatures of ageing: correlations with behaviour*, in: Scientific analysis of ancient and historic textiles: informing preservation, display and interpretation: postprints. Rob Janaway, Paul Wyeth (Hrsg.), Archetype Publications, London 2005, S. 137—142.

Young 2005

Christina Young, *Accelerated ageing of fabric supports: is it possible?*, in: Scientific analysis of ancient and historic textiles: informing preservation, display and interpretation: postprints. Rob Janaway, Paul Wyeth (Hrsg.), Archetype Publications, London 2005, S. 111—117.

Young/Ackroyd 2001

Christina Young, Paul Ackroyd, *The mechanical behaviour and environmental response of paintings to three types of lining treatment*, National Gallery technical bulletin **22** 2001, S. 85-104.

Young/Hibberd 1999a

Christina Young, Roger Hibberd, *A comparison of the physical properties of 19th-century canvas linings with acid aged canvas*, in: ICOM Committee for Conservation 12th triennial meeting preprints, Lyon, 29 August—3 September 1999. Janet Bridgland (Hrsg.), James & James, London 1999, S. 353—360.

Young 1996

Christina R. T. Young, *Measurement of the biaxial tensile properties of paintings on canvas*, Dissertation, University of London, 1996.

Young 1999

Christina R. T. Young, *Towards a better understanding of the physical properties of lining materials for paintings: interim results*, The Conservator **23** 1999, S. 83—91.

Young/Hibberd 1999b

Christina R. T. Young, Roger D. Hibberd, *Biaxial tensile testing of paintings on canvas*, Studies in Conservation **44** 1999, S. 129—141.

Zellcheming-Merkblatt V/17/80

V/17/80:1980, Prüfung von Papier, Karton und Pappe, Elektrometrische Messung des pH-Wertes auf der Oberfläche von Papier ("Oberflächen-pH-Wert"), Hrsg. Verein der Zellstoff- und Papier-Chemiker und -Ingenieure.

Zellcheming-Merkblatt IV/42/67

IV/42/67:1967, Prüfung von Zellstoff, Bestimmung des Trockengehaltes von Zellstoffproben, Hrsg. Verein der Zellstoff- und Papier-Chemiker und -Ingenieure.

Zenker 1998

Evelyn Zenker, *Über Kett- und Schussfaden*, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung **12** (2) 1998, S. 338—350.

Zervos 2007

Spiros Zervos, *Characterization of changes induced by ageing to the microstructure of pure cellulose paper by use of a gravimetric water vapour adsorption technique*, Cellulose **14** (4) 2007, S. 375–384.

Zervos/Moropoulou 2006

Spiros Zervos, Antonia Moropoulou, *Methology and criteria for the evaluation of paper conservation interventions - A literature review*, Restaurator **27** (4) 2006, S. 219—274.

Zou et al. 1994

X. Zou, N. Gurnagul, T. Uesaka, J. Bouchard, *Accelerated aging of papers of pure cellulose: mechanism of cellulose degradation and paper embrittlement*, Polymer Degradation and Stability **43** (3) 1994, S. 393—402.

Zou et al. 1996

X. Zou, T. Uesaka, N. Gurnagul, *Prediction of paper permanence by accelerated aging I: Kinetic analysis of the aging process*, Cellulose **3** 1996, S. 243—267.

Zumbühl 2003

Stefan Zumbühl, *Proteinische Leime-Ein vertrauter Werkstoff? Aspekte zum feuchtephysikalischen Verhalten von Gelatine*, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung **17** (1) 2003, S. 95—104.

Zumbühl/Scherrer 2003

Stefan Zumbühl, Nadim C. Scherrer, *Aktive Passivierung der Degradation cellulotischer Strukturgefüge. Untersuchungen zur "Entsäuerung" textiler Gemäldebildträger*, Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung **17** (2) 2003, S. 387—396.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 3.1: Schematischer Aufbau und Zusammensetzung der Elementarfaser von Flachs und ihre Position im Pflanzenstängel..... 36
Abbildung 3.2: Sorptions- und Desorptionsisotherme von Baumwolle bei 25 °C mit Hysterese und Einteilung der Bindungsarten der Wassermoleküle..... 39
Abbildung 3.3: Desorptionskurven von Flachsgarn aus Satlow 1951, S. 626.....41
Abbildung 3.4: Auswirkung der Temperatur (10—50 °C) auf die Sorptionsisothermen von Baumwolle aus Urquhart 1960, S. 19..... 41
Abbildung 3.5: Dimensionsänderung der Faserdicke und -länge in Abhängigkeit zur rel. Feuchte am Beispiel Baumwolle. Aus Collins 1939, S. P46..... 42
Abbildung 3.6: Volumenszunahme von Flachsfasern in Abhängigkeit zum Feuchtezuschlag. Werte aus Chakravarty 1971, S. 320..... 42
Abbildung 3.7: Cellulosemolekül mit blau eingezeichneten intramolekularen Wasserstoffbrückenbindungen..... 46
Abbildung 3.8: Cellulosemolekül mit blau eingezeichneten intra- und intermolekularen Wasserstoffbrücken-bindungen. Molekülkette nach Klemm et al. 1998, S. 10.....47
Abbildung 3.9: Fransenmicelle in Anlehnung an Kast et al. 1955, S. 192.....47
Abbildung 3.10: Fransen-Micellen-Modell..... 47
Abbildung 3.11: Aufnahme von Feuchte von nativen Faserstoffen in Abhängigkeit vom Verhältnis von kristallinen und amorphen Bereichen der Cellulose. Brückle 2015b, S. 95.....49
Abbildung 3.12: Sorptionsisotherme von Grünflachs, feldgetrocknet und Röstflachs nach der Tauröste. 65
Abbildung 3.13: Sorptionsisothermen von Baumwolle und Flachs nach Sommer 1956, S. 2 (verändert). 78
Abbildung 3.14: Sorptionsisothermen von Baumwolle und Flachs erstellt von Mally bei.....78
Abbildung 3.15: Verkürzung des Gewebes aufgrund der Breitenquellung des Garns..... 89
Abbildung 3.16: Kraft-Dehnungs Diagramm von Flachsgewebe in Kettrichtung aus Mecklenburg 2005, S. 133..... 93
Abbildung 3.17: Kraft-Dehnungs Diagramm von Flachsgewebe in Schussrichtung aus Mecklenburg 2005, S. 134..... 93
Abbildung 3.18: Dimensionsänderungen einer frei hängenden Leinwand aus Mecklenburg 2005, S. 123. 99
Abbildung 3.19: Spannungsänderung einer Leinwand, biaxial gespannt, vor und nach der Benetzung mit flüssigem Wasser. Aus Lipinski 2010, S. 113..... 100

Abbildung 3.20: Dimensionsänderungen von zwei Leinwänden, unbehandelt und dekatiert. 103
Abbildung 3.21: Dimensionsänderung zweier Proben von Hasenhautleim während der Desorption bei 25 °C. Aus Mecklenburg/Tumosa 1991b, S. 197. 107
Abbildung 3.22: Sorptionsisothermen (25 °C) von Fischleim, Hautleim und Knochenleim. 107
Abbildung 3.23: Dimensionsänderungen eines Gelatinefilms biaxial gespannt, bei variierenden Umgebungsfeuchten. Aus Lipinski 2010, S. 159. 108
Abbildung 3.24: Dimensionsänderungen von Hasenhautleimfilmen, die während der vorhergehenden Trocknung unterschiedlich gespannt waren. Aus Karpowicz 1989, S. 69. 109
Abbildung 3.25: Schrumpfen eines Hasenhautleimfilms durch Befeuchtung. Der Leimfilm wurde zuvor auf einer Aluminiumplatte getrocknet. Aus Karpowicz 1989, S. 70. 109
Abbildung 3.26: Schrumpfen eines Hasenhautleimfilms durch zyklisches Be- und Entfeuchten. Aus Karpowicz 1989, S. 71. 109
Abbildung 3.27: Sorptionsisotherme (20 °C) eines Films aus gekochter Stärke. Aus Valkó 1937, S. 661. 111
Abbildung 3.28: Verhalten einer vorgeleimten Leinwand in Schussrichtung, biaxial gespannt, in Abhängigkeit der relativen Fechte. Aus Roche 2005, S. 201. 112
Abbildung 3.29: Sorptionsisothermen von Leinölfilmen mit unterschiedlicher Pigmentvolumenkonzentration (PVK) aus Klopfer 1974, S. 27. 115
Abbildung 3.30: Sorptionsisotherme eines Halbölgrundes nach Wehlte. Aus Holl 2016, S. 184. 115
Abbildung 3.31: Dimensionsänderungen durch Sorption und Desorption eines 10 Jahre alten Films aus Bleiweiß in kalt gepresstem Leinöl. Aus Mecklenburg 2005, S. 129. 116
Abbildung 3.32: Sorptionsisotherme einer Leim-Kreide-Grundierung. Aus Holl 2016, S. 184. 116
Abbildung 3.33: Dimensionsänderungen durch Sorption und Desorption von Hautleim (Hide Glue), Leim-Kreide Grundierung (Gesso) mit den Pigmentvolumenkonzentrationen (PVC) von 58,3 % und 81,6 %. Aus Mecklenburg 2005, S. 125. 117
Abbildung 3.34: Auswirkung der Umgebungsfeuchte auf das Spannungs-Dehnungs Verhalten von Bleiweiß-Leinöl Filmen (36 Monate alt) bei 21°C. Aus Mecklenburg 1982, Abb. 6a, ohne Seitenangabe. 117
Abbildung 3.35: Biaxial gespanntes Gewebe mit Kleistergrundierung. Aus Carlyle et al. 2008, S. 129. . 119
Abbildung 3.36: Biaxial gespannte Gewebe mit Kleistergrundierung, sowie Zusätzen von Venezianer Terpentin und Bleiweiß in Öl. Aus Carlyle et al. 2008, S. 129. 119
Abbildung 3.37: Sorptionsisotherme (20 °C) verschiedener Öl gebundener Farbfilme. Aus Hedley 1993, S. 120. 121
Abbildung 3.38: Sorptionsisothermen von Zinkweiß bzw. Ocker in Leinöl. Aus Holl 2016, S. 184. 121
Abbildung 3.39: Verhalten eines Leinwandgemäldes in Schussrichtung biaxial gespannt, in Abhängigkeit

der relativen Feuchte. Aus Roche 2005, S. 203..... 122
Abbildung 3.40: Berechnetes Verhalten eines Leinwandgemäldes aufgrund Sorption und Desorption. Aus Mecklenburg 1982, Abbildung 15 ohne Seitenzahl..... 123
Abbildung 3.41: Spannungsänderungen verschiedener Materialien des Leinwandgemäldes, die Michalski als Grundlage für seine rechnerische Modellierung des Leinwandgemäldes verwendete. Aus Michalski 1991, S. 237..... 124
Abbildung 3.42: Veränderung des Verhältnisses zwischen amorphen und kristallinen Bereichen der Cellulose durch Hydrolyse. Aus Tímár-Balázsy/Eastop 1998 S. 29.....129
Abbildung 3.43: Veränderung der Hohlraumstrukturen in Papier durch thermische Alterung und anschließende Befeuchtung. Aus Kato/Cameron 1999, S. 1476..... 132
Abbildung 3.44: Degradationsrate von Cellulose (Zellstoff) in Abhängigkeit zur relativen Feuchte. Aus Zou et al. 1996, S. 253.....133
Abbildung 3.45: Sorptionsisotherme eines neuen und eines historischen (16. Jh.) Flachsgarnes aus Wyeth 2005, S. 141..... 136
Abbildung 3.46: Gleichgewichtsfeuchte eines gewerblich grundierten Gewebes, datiert ca. 1868. Aus Hedley 1993, S. 116..... 140
Abbildung 3.47: Verhalten einer Probe aus dem Gemälde von Duncan Smith, 1906. Dimensionsänderungen in uniaxialer Aufspannung. Aus Mecklenburg 2005, S. 149.…143
Abbildung 3.48: Historische Gemäldeproben in biaxialer Aufspannung aus Lipinski 2010, S. 153, 157. 145
Abbildung 5.1: Bestimmung des Fasersteigungswinkels am Garn..... 168
Abbildung 5.2: Beispiel für die unterschiedliche Positionierung der lokalen Hilfslinie für die Auswertung der Bande bei 2900 cm-1 182
Abbildung 5.3: Ergebnisse Kristallinitätsindex (C. I.) in Abhängigkeit von verschiedenen Grundlinienkorrekturen..... 184
Abbildung 5.4: Klemmbacken der Zugprüfmaschine mit Maßen. Rechts: Einsetzen des Garnabschnitts mit Hilfe eines Stahllineals und dazu passenden Magetstreifens. Aus Bräunig et al. 2016, S. 354..... 188
Abbildung 5.5: Fünf Typen von Sorptionsisothermen nach Urquhart 1960, S. 16.....193
Abbildung 5.6: NIR-Spektrum (normiert) eines Flachsgewebes und von Wasser. Aus: von Reden et al. 2015, S. 142..... 196
Abbildung 5.7: Breite einer historischen Flachsfaser der Wandbespannung Ermlitz (H-18-E1) in Abhängigkeit der relativen Feuchte im VP-REM..... 199
Abbildung 5.8: Breitenquellung der historischen Flachsfaser der Wandbespannung Ermlitz (H-18-E1) im VP-REM..... 199

Abbildung 5.9: Querschnitt einer neuen Flachsfaser (N1) im Nano-CT, Aufnahme: IKTS Dresden.....201
Abbildung 5.10: Längsansicht einer neuen Flachsfaser (N1) im Nano-CT, Aufnahme: IKTS Dresden.....202
Abbildung 6.1: Neues Flachsgewebe N1. Links wie gekauft, rechts gewaschen. Horizontal Kette, vertikal Schuss..... 204
Abbildung 6.2: Neue Flachsgewebe N6, N7 und N8..... 204
Abbildung 6.3: Neue Flachsgewebe N2—N5 (links) mit gebleichten Pendants (rechts).....209
Abbildung 6.4: Benennungsschema der verwendeten Gewebeproben.....218
Abbildung 6.5: Veränderung der Gewebefüllung durch die Alterung im Klimaschrank.....221
Abbildung 6.6: Ergebnisse der pH-Werte. Mittelwerte aus drei Messungen mit Standardabweichung. 222
Abbildung 6.7: Grenzviskositätszahl η [ml/g] der künstlich gealterten Gewebe mit der jeweiligen prozentualen Abnahme im Vergleich zum neuen Gewebe N1.....228
Abbildung 6.8: Grenzviskositätszahl η [ml/g] der ungebleichten und gebleichten Gewebe mit der jeweiligen prozentualen Abnahme im Vergleich zum ungebleichten Gewebe.....229
Abbildung 6.9: Grenzviskositätszahl η [ml/g] historischer Proben..... 230
Abbildung 6.10: IR-Spektrum der Probe N1 Kettfaden mit Auswertung..... 232
Abbildung 6.11: IR-Spektrum der historischen Faserprobe H-17/18-D mit Doppelspitze.....232
Abbildung 6.12: Mittelwerte des Kristallinitätsindex C. I. mit Standardabweichungen.....233
Abbildung 6.13: Ergebnisse der Höchstzugkraft [N] der künstlich gealterten Gewebe und ihre prozentuale Abnahme im Vergleich zum nicht gealterten Gewebe N1.....236
Abbildung 6.14: Höchstzugkraftdehnung [%] der künstlich gealterten Gewebe und ihre prozentuale Abnahme im Vergleich zum neuen Gewebe N1..... 237
Abbildung 6.15: Mittelwerte der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft fH [cN/tex] mit Standardabweichungen..... 239
Abbildung 6.16: Sorptionsisothermen (25°C) des neuen und eines künstlich gealterten Gewebes der statischen Methode..... 244
Abbildung 6.17: Adsorptionsisotherme (25 °C) des neuen Gewebes N1 und der belichteten Gewebe. 244
Abbildung 6.18: Ausschnitt der Adsorptionsisothermen (25 °C) künstlich gealterter Gewebe.....245
Abbildung 6.19: Adsorptionsisotherme (25 °C) der im Klimaschrank gealterten, gespannten (-K4-g und -K10-g) und nicht gespannten (-K4-u und K10-u) Gewebe..... 246
Abbildung 6.20: Darstellung der Hysterese: Differenz zwischen Feuchtezuschlag von Sorption und Desorption der künstlich gealterten Gewebe..... 246
Abbildung 6.21: Adsorptionsisotherme (25 °C) des neuen Gewebes N3, in zwei Varianten des Bleichens (B1 und B2)..... 248
Abbildung 6.22: Darstellung der Hysterese: Differenz zwischen Feuchtezuschlag Sorption und

Desorption der gebleichten Gewebe..... 248
Abbildung 6.23: Sorptionsisotherme (25 °C) des neuen und eines künstlich gealterten Gewebes. Dynamische Methode DVS..... 250
Abbildung 6.24: Desorptionsisothermen (25 °C) aller Proben der dynamischen Methode (DVS).....252
Abbildung 6.25: Sorptionsisotherme (25 °C) aller Proben der dynamischen Methode (DVS).....253
Abbildung 6.26: Vergleich der experimentell ermittelten Messwerte und der GAB-Isotherme.....256
Abbildung 6.27: Modellparameter C und X der dynamischen Methode DVS.....256
Abbildung 6.28: Modellparameter K der dynamischen Methode DVS.....257
Abbildung 6.29: Modellparameter K der statischen Methode..... 258
Abbildung 6.30: Modellparameter Cg und Xm der statischen Methode.....259
Abbildung 6.31: Sorptionsisotherme (25 °C) N1 und N1-A-X168-K4-u dynamische Methode TU Dresden. 260
Abbildung 6.32: Sorptionsisotherme (25 °C) N1 und N1-A-X168-K4-u statische Methode HfBK Dresden. 260
Abbildung 6.33: Temperaturentwicklung im Infrarottrockner auf der Oberfläche von Gewebe N1 für fünf programmierte Temperaturen..... 264
Abbildung 6.34: Messung eines originalen Bildträgers mit dem SurveNIR System.....265
Abbildung 6.35: Gravimetrisch ermittelter Feuchtezuschlag aller vier Gewebe (Mittelwert mit Standardabweichung)..... 265
Abbildung 6.36: Trocknungskurve aller vier Gewebe: Feuchtezuschlag bei 23 °C/50 %rF während der Trocknung bei 105 °C..... 266
Abbildung 6.37: Feuchtezuschlag u von Gewebe N1 nach 300 s Trocknung bei verschiedenen Temperaturen (Mittelwerte mit Standardabweichung).....267
Abbildung 6.38: NIR-Spektren (normiert) von Gewebe N6. Durch die verschiedenen Trocknungszeiten bei 105 °C ergeben sich unterschiedliche Werte für den Feuchtezuschlag, welche sich im Spektrum widerspiegeln..... 269
Abbildung 6.39: Validierung der Methode anhand des Testsets. Korrelation der von SurveNIR vorhergesagten (Actual) und tatsächlich gemessenen (Nominal) Werten für den Feuchtezuschlag..... 269
Abbildung 6.40: Korrelation zwischen Höchstzugkraft der Gewebe und Grenzviskositätszahl (GVZ).....274
Abbildung 6.41: Korrelation zwischen feinheitsbezogener Höchstzugkraft des Garns (Nullzugfestigkeit) und Grenzviskositätszahl (GVZ)..... 275
Abbildung B.1: Detail N1..... 304
Abbildung B.2: Detail N1-A-TL..... 305
Abbildung B.3: Detail N1-A-X84..... 306

Abbildung B.4: Detail N1-A-X168..... 307
Abbildung B.5: Detail N1-A-K4-u..... 308
Abbildung B.6: Detail N1-A-K4-g..... 309
Abbildung B.7: Detail N1-A-K10-u..... 310
Abbildung B.8: Detail N1-A-K10-g..... 311
Abbildung B.9: Detail N1-A-TL-K4-u..... 312
Abbildung B.10: Detail N1-A-X84-K4-u..... 313
Abbildung B.11: Detail N1-A-X168-K4-u..... 314
Abbildung B.12: Detail N2..... 315
Abbildung B.13: Detail N2-B1..... 316
Abbildung B.14: Detail N3..... 317
Abbildung B.15: Detail N3-B1..... 318
Abbildung B.16: Detail N3-B2..... 319
Abbildung B.17: Detail N4..... 320
Abbildung B.18: Detail N4-B1..... 321
Abbildung B.19: Detail N5..... 322
Abbildung B.20: Detail N5-B1..... 323
Abbildung B.21: Detail N6..... 324
Abbildung B.22: Detail N8..... 325
Abbildung B.23: Detail N7..... 326
Abbildung B.24: Porträt Philipp Melanchthon..... 327
Abbildung B.25: Detail H-16/17-M..... 327
Abbildung B.26: Kaiser Friedrich der Andere verleiht dem Deutschen Orden Wappeninsignien.....328
Abbildung B.27: Detail H-17/18-D..... 328
Abbildung B.28: Detail H-18-E1..... 329
Abbildung B.29: Wandbespannung Herrenhaus Ermlitz Weißer Saal. 3OOB3..... 329
Abbildung B.30: Wandbespannung Herrenhaus Ermlitz, Weißer Saal. 3WOB1.....330
Abbildung B.31: Detail H-19-T1..... 331
Abbildung B.32: Adolph Thomas: Amor erblickt die schlafende Psyche..... 331
Abbildung B.33: Detail H-19-T2..... 332
Abbildung B.34: Adolph Thomas: Amor entschwebt der verzweifelten Psyche..... 332
Abbildung B.35: Josef Hegenbarth: Löwe und fressender Leopard..... 333
Abbildung B.36: Detail H-20-H1..... 333
Abbildung B.37: Josef Hegenbarth: Auf der Aussichtsplattform..... 334
Abbildung B.38: Detail H-20-H2..... 334

Abbildung B.39: König Maximilian I, Joseph. 335
Abbildung B.40: Detail H-19-M. 335
Abbildung B.41: Detail H-20-U1. 336
Abbildung B.42: Torso eines Frauenkörpers. 336
Abbildung B.43: Detail H-20-U2. 337
Abbildung B.44: Albert Ludwig Jahn: Stadt am Fluss (Heiligenstadt). 337
Abbildung B.45: Detail H-20-U3. 338
Abbildung B.46: Erschrockenes Mädchen. 338
Abbildung B.47: Detail H-20-U4. 339
Abbildung B.48: Frau mit Kopftuch im Halbprofil. 339
Abbildung B.49: Detail H-20-U5. 340
Abbildung B.50: Frauenporträt (in Tracht). 340

Tabellenverzeichnis

Tabelle 3.1: Publizierte Werte des Durchschnittlichen Polymerisationsgrades (DP) bzw. der Grenzviskositätszahl (GVZ) von Cellulose aus Flachs unterschiedlicher Herkunft, Verarbeitung und Alter. 44
Tabelle 3.2: Publizierte Werte für die Kristallinität von Flachs. 50
Tabelle 3.3: Füllung von Poren mit Wassermolekülen in Abhängigkeit vom Porendurchmesser und von der rF. 54
Tabelle 3.4: Zusammensetzung der Elementarfaser von Flachs [%] nach verschiedenen Autoren. Zum Vergleich die Zusammensetzung von Baumwolle nach Turner 1949. 57
Tabelle 3.5: Fettverlust in [%] bei 17—18,5 °C und 45—55 %rF durch Exktraktion in Petroläther und Alkohol nach Hönig 1918, S. 146—147. 59
Tabelle 3.6: Anteile von Pektin in verschiedenen Hechelflächsen aus Schilling 1930b, S. 275. 65
Tabelle 3.7: Feuchtezuschlag [%] für gehechelten Flachs, unterschiedlich geröstet. 66
Tabelle 3.8: Monatliche Durchschnittswerte für den Feuchtezuschlag von Flachs, wassergeröstet, nach Schaposchnikoff 1928, S. 846. 68
Tabelle 3.9: Publizierte Werte für die Gleichgewichtsfeuchte von Flachs als technische Faser. 68

Tabelle 3.10: Feuchtezuschlag [%] von unterschiedlich versponnenen, wassergerösteten Flachsfasern nach Hönig 1918. 72
Tabelle 3.11: Feuchtezuschlag [%] von Flachs nach unterschiedlichen Autoren. 72
Tabelle 3.12: Feuchtezuschlag [%] für Flachsgarn nass gesponnen und roh, Nm 18,2 (NeL 30) bei 20 °C und verschiedenen relativen Feuchten nach Scheithauer 1941. 72
Tabelle 3.13: Feuchtezuschlag [%] von Flachsgarn, nassversponnen, unterschiedlicher Garnnummer bei 20 °C/65 %rF. 75
Tabelle 3.14: Trocknungsdauer und Restfeuchte von Garn aus Flachs und Flachswerg nach Trocknung unter verschiedenen Bedingungen. Aus Satlow 1951, S. 625. 87
Tabelle 3.15: Dimensionsänderungen von ungespannten Flachsgeweben in Kettrichtung, Daten aus Mager 2007, S. 188—197. 90
Tabelle 3.16: Gleichgewichtsfeuchte bei 90 %rF gemessen jeweils an einem 2 cm langen Garnabschnitt. Daten aus Wyeth 2005, S. 141. Dort keine Angaben zur Temperatur. 136
Tabelle 3.17: Gleichgewichtsfeuchte zweier Leinwände neu und degradiert. Daten bei 94 %rF aus Dick 2006, S. 35—36 bzw. Neufert 2006, S. 82. Daten bei 96 %rF aus Bennke 2007, S. 65. 136
Tabelle 3.18: Feuchtezuschlag bei 18 °C / 34 %rF für neuen und gealterten Flachs. Die Proben wurden vor der Messung bei 70 °C bis zur Massekonstanz getrocknet. Aus Princi et al. 2005, S. 372. 137
Tabelle 3.19: Berechnete Menge der aufgenommenen Feuchte für eine grundierte Leinwand der Größe 60 x 90 cm. Daten aus Hedley 1993, S. 116. 141
Tabelle 3.20: Gleichgewichtsfeuchte einer vorgeleimten, grundierten (auf Öl basierende Grundierung) Leinwand, künstlich gealtert. Aus Odlyha et al. 1996, S. 301. 141
Tabelle 5.1: Dauer der künstlichen Alterung durch erhöhte Temperatur in Bezug zur natürlichen Alterung nach unterschiedlichen Autoren. 161
Tabelle 5.2: Mindestlängen der Messfelder zur Erfassung der Fadendichte nach Reumann 2000d S. 392. 169
Tabelle 5.3: Vergleich zweier Varianten für die Positionierung der lokalen Hilfslinie für die Intensitätsmessung der Banden. 182
Tabelle 5.4 Ergebnisse Kristallinitätsindex abhängig von der Positionierung der lokalen Hilfslinie für die Intensitätsmessung der Bande bei 2900 cm-1. 183
Tabelle 5.5: Werte der GAB-Konstanten Cg und K mit korrespondierenden Bindungsarten der Wassermoleküle Quirijns et al. 2005, S. 1807. 195
Tabelle 6.1: Herstellerangaben der neuen Flachsgewebe. 205
Tabelle 6.2: Übersicht der durchgeführten künstlichen Alterung von Gewebe N1 mit zugehörigen Probenbezeichnungen. 206

Tabelle 6.3: Übersicht der Bleichverfahren von vier unterschiedlichen Flachsgeweben und deren Probenbezeichnung..... 208
Tabelle 6.4: Übersicht der Proben historischer Bildträger, die im experimentellen Teil verwendet wurden..... 211
Tabelle 6.5: Ergebnisse der Gewebestrukturanalyse für alle verwendeten Gewebeproben.....220
Tabelle 6.6: Feuchtezuschlag u [%] (18 °C/60 %rF) aller Faserproben, deren Viskosität bestimmt wurde. 226
Tabelle 6.7: Ergebnisse Kristallinitätsindex für historische Bildträger aus Kavkler et al. 2011, S. 578.....235
Tabelle 6.8: Ergebnisse der Nullzugfestigkeit an Flachsgarnen unterschiedlich gealtert aus Hackney/Hedley 1984, S. 84.2.19..... 240
Tabelle 6.9: Ergebnisse der Nullzugfestigkeit: Umrechnung der Höchstzugkraft FH [N] in die Bruchkraft [g]..... 240
Tabelle 6.10: Feuchtezuschlag u [%] der künstlich gealterten Gewebe für Sorption bei 25°C statische Methode..... 243
Tabelle 6.11: Feuchtezuschlag u [%] von neuen und gebleichten Flachsgeweben für Sorption bei 25 °C statische Methode..... 247
Tabelle 6.12: Aus zwei Bestimmungen gemittelter Feuchtezuschlag u [%] (25 °C) während Sorption.. .250
Tabelle 6.13: Darstellung der Hysterese: Differenz zwischen Feuchtezuschlag u [%] Desorption und Feuchtezuschlag Sorption..... 251
Tabelle 6.14: Ermittelte GAB-Konstanten für alle Proben der dynamischen Methode (DVS) für den Bereich 0—95 %rF Desorption..... 254
Tabelle 6.15: Ermittelte GAB-Konstanten für Proben der statischen Methode für den Bereich 30—95 %rF Desorption..... 255
Tabelle A.1: Berechnung der GVZ nach Formel 6.1, S. 225, aus Werten der relativen und spezifischen Viskosität bei 20 °C von Backes 2005, S. 138. Werte von BACKES in grau, im Rahmen der vorliegenden Arbeit berechnete Werte in schwarz. Die GVZ wurde mit und ohne Berücksichtigung des Feuchtezuschlags berechnet.....294
Tabelle A.2: Feuchtezuschlag nass gesponnener, ungebleichter und gebleichter Leinengarne der Garnnummer Nm 18,2 (NeL 30) während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 %rF und etwa 20 °C aus Scheithauer 1941, S. 67..... 294
Tabelle A.3: Feuchtezuschlag nass gesponnener roher Flachsgarne unterschiedlicher Garnnummer während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 % rF und etwa 20 °C aus Scheithauer 1941, S. 68..... 295
Tabelle A.4: Feuchtezuschlag trocken gesponnener roher Werggarne unterschiedlicher Garnnummer während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 % rF und etwa 20 °C aus Scheithauer

1941, S. 68..... 295
Tabelle A.5: Feuchtezuschlag nass gesponnener roher Flachs- und Werggarne gleicher Garnnummer während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 % rF und etwa 20 °C aus Scheithauer 1941, S. 68..... 296
Tabelle A.6: Feuchtezuschlag nass gesponnenes rohes Flachsgarn Nm 18,2 (NeL 30) während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 % rF und 80 % rF und etwa 20 °C aus Scheithauer 1941, S. 70..... 296
Tabelle A.7: Feuchtezuschlag nass gesponnenes rohes Flachsgarn Nm 18,2 (NeL 30) während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 % rF und 30 % rF und etwa 20 °C aus Scheithauer 1941, S. 71..... 297
Tabelle A.8: Feuchtezuschlag nass gesponnenen rohen Flachsgarnes Nm 18,2 (NeL 30) nach verschiedener Vortrocknung während einer Lagerung in Strähnform bei etwa 65 %rF und 20 °C, der Feuchtezuschlag bezieht sich auf das Trockengewicht in % nach Vortrocknung, aus Scheithauer 1941, S. 72..... 297
Tabelle A.9: Feuchtezuschlag und Volumenszunahme von Flachsfasern nach Chakravarty 1971, S. 320. 298
Tabelle A.10: Feuchtezuschlag [%] für entfetteten Flachs publiziert von Hönig 1918, S. 159.....298
Tabelle A.11: Berechnung der Größenveränderung der Farbfilme durch Sorption. Berechnet aus den gemessenen Daten von Mecklenburg 1982, Abbildung 3a bis 3d, ohne Seitenzahl.....299
Tabelle B.1: Ergebnisse der Messung der pH-Werte mit der Oberflächenelektrode.....341
Tabelle B.2: Berechnung des Feuchtezuschlags u [%] für 18 °C/60 %rF nach Trocknung bei 105 °C.....343
Tabelle B.3: Schätzung des Feuchtezuschlags für die Berechnung der Einwaage für die Viskositätsbestimmung..... 344
Tabelle B.4: Mittelwerte des Kristallinitätsindexes (C. I.) aus Einzelmessungen aus Tabelle B.5 mit dazugehörigen Standardabweichungen.....351
Tabelle B.5: Messergebnisse der Intensität der Transmissionsminima zur Berechnung des Kristallintitätsindexes.....351
Tabelle B.6: Ergebnisse der Höchstzugkraft [N] von Geweben aus dem Streifen-Zugversuch. STABW=Standardabweichung.....356
Tabelle B.7: Ergebnisse der Höchstzugkraftdehnung [%] von Geweben aus dem Streifen-Zugversuch. STABW=Standardabweichung.....357
Tabelle B.8: Einzelergebnisse der Probenmasse m [g] von Garnabschnitten der Länge 5 mm, daraus berechnete Feinheit Tt [tex]. Ergebnisse der Höchstzugkraft FH [cN] und der feinheitsbezogenen Höchstzugkraft fH [cN/tex] mit Mittelwerten und Standardabweichungen (STABW)..... 357

Tabelle B.9: Ergebnisse der Nullzugfestigkeit: Umrechnung der Höchstzugkraft FH [N] (Mittelwert aller Messungen) in die Bruchkraft [g] 364
Tabelle B.10: Messergebnisse und daraus errechneter Feuchtezuschlag der Sorptionsisotherme DVS 25 °C 380
Tabelle B.11: Messergebnisse und daraus errechneter Feuchtezuschlag der Sorptionsisotherme DVS 25 °C 381
Tabelle B.12: Messergebnisse und daraus errechneter Feuchtezuschlag der Sorptionsisotherme DVS 25 °C 382
Tabelle B.13: Messergebnisse und daraus errechneter Feuchtezuschlag der Sorptionsisotherme DVS 25 °C 383
Tabelle B.14: Messergebnisse und daraus errechneter Feuchtezuschlag der Sorptionsisotherme DVS 25 °C 384

Versicherung

gemäß § 5 Abs. 1 der Promotionsordnung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt. Die geltenden gesetzlichen Bestimmungen und die Ordnung der Hochschule für Bildende Künste Dresden zur Sicherung guter künstlerischer und wissenschaftlicher Praxis in der geltenden Fassung erkenne ich an und verpflichte mich zu deren Einhaltung.

München, 10. Juli 2017