



Flächennutzungsmonitoring XII mit Beiträgen zum Monitoring von Ökosystemleistungen und SDGs

IÖR Schriften Band 78 · 2020

ISBN: 978-3-944101-78-1

Verbesserung der Informationslage zur Flächennutzung mittels aktueller und zukünftiger Fernerkundungsdaten

Marion Pause, Anke Hahn, Angela Lausch

Pause, M.; Hahn, A.; Lausch, A. (2020): Verbesserung der Informationslage zur Flächennutzung mittels aktueller und zukünftiger Fernerkundungsdaten. In: Meinel, G.; Schumacher, U.; Behnisch, M.; Krüger, T. (Hrsg.): Flächennutzungsmonitoring XII mit Beiträgen zum Monitoring von Ökosystemleistungen und SDGs. Berlin: Rhombos, IÖR Schriften 78, S. 241-250.

DOI: <https://doi.org/10.26084/12dfns-p024>

Verbesserung der Informationslage zur Flächennutzung mittels aktueller und zukünftiger Fernerkundungsdaten

Marion Pause, Anke Hahn, Angela Lausch

Zusammenfassung

Die Umweltfernerkundung hat in den vergangenen zwei Jahrzehnten enorme Fortschritte erzielt und bietet Potenzial zur Erweiterung behördlicher Geodatenbestände und vielfältiger Anwendung. Insbesondere abbildende Hyperspektraldaten und Thermaldaten bieten die Möglichkeit für die Bereitstellung neuer thematische Informationen (GIS-Layer). Ein zentrales Einsatzgebiet ist die Analyse, Visualisierung und Bereitstellung von Informationen zu den Wirkungsketten grüner und blauer Infrastruktur in Landschaften und Siedlungen. Der Beitrag vermittelt einen Überblick zu Anwendungen, Aspekten und Anforderungen an die Akquise von Hyperspektraldaten und Thermaldaten.

Schlagnote: Hyperspektraldaten, Thermaldaten, Landmanagement, Klimaanpassung, GI/BI-Monitoring

1 Einführung

Die Fernerkundung der Landoberfläche hat in den vergangenen zwei Jahrzehnten enorme Fortschritte erzielt. Diese Fortschritte sind sichtbar i) in der Entwicklung und Bereitstellung neuer Sensortechnologien, ii) im *Open Access* zu kontinuierlichen Zeitreiheninformationen sowie iii) in der Verfügbarkeit wissenschaftlich basierter *proof-of-principle* Ergebnisse hinsichtlich der Anwendungsmöglichkeiten. Herausragende Anwendungspotenziale zeigen sogenannte abbildende Hyperspektraldaten (abbildende Spektroskopie, HS) und abbildende Thermaldaten (Thermografie, TIR) für die Bereitstellung von Informationen zum Zustand und der raum-zeitlichen Dynamik von Landschaften, Vegetation und Siedlungsgebieten (urban und dörflich). Ein zentrales Anwendungsbeispiel im Kontext der Klimaanpassung unserer Landschaften und Siedlungen ist die beobachtungsbasierte (nicht modelliert) räumlich explizite Visualisierung (Monitoring) der bodennahen Lufttemperatur mittels Thermaldaten. Damit werden GI/BI-Wirkungsketten (GI: grüne Infrastruktur, photosynthetisch aktive Vegetation; BI: blaue Infrastruktur, Wasserflächen) sichtbar und können somit zur weiteren Kommunikation und Bewertung von Landschaften aufbereitet werden. GI/BI-Wirkungsketten sind von zentraler Bedeutung für den Erhalt vielfältiger Funktionen unserer Landschaften (z. B. Bodenspeicherkapazität) und Siedlungen (z. B. Kühlung und Sauerstoffproduktion) und können als Planungsgrundlage dienen. Darüber hinaus kann mittels HS-Daten die Objektidentifikation (z. B. Materialien von Dachflächen, Baumarten) und Klassifikation

(z. B. Vegetations- und Biotopklassifikation) verbessert werden, um beispielsweise funktionale Zusammenhänge zwischen Pflanzengemeinschaften auf Privatgrundstücken und deren Effekt auf die Siedlungstemperatur messbar abzubilden (Abb. 1). Man kann die Ökosystemdienstleistung kleinräumig dokumentieren, wie beispielsweise die folgenden Fragen adressieren: Welchen Einfluss haben Agroforstsysteme auf das lokale Klima und den Biotopverbund? Welchen Beitrag liefert ein bestimmter Siedlungsbereich zur Temperaturregulierung im Stadtgebiet?

In den folgenden Kapiteln soll ein Überblick zu folgenden Aspekten vermittelt werden:

- Welchen konkreten Beitrag können HS- und TIR-Daten für ein nachhaltiges Flächenmanagement liefern?
- Welche Daten stehen zur Verfügung und was ist bei deren Akquise zu beachten?
- Welche Ansätze für ein Monitoring sind aktuell denkbar?

Akteure umweltrelevanter Bereiche (Stadt- und Regionalplanung, Land- und Forstwirtschaft, Klima, Landschaftspflege, Wasserversorgung, Energie, Wirtschaft, öffentliche Hand) sowie die interessierte Öffentlichkeit können auf individuelle Weise von den neuen Fernerkundungsdaten profitieren und sollen durch das Aufzeigen von Beispielen in diesem Beitrag angesprochen werden.

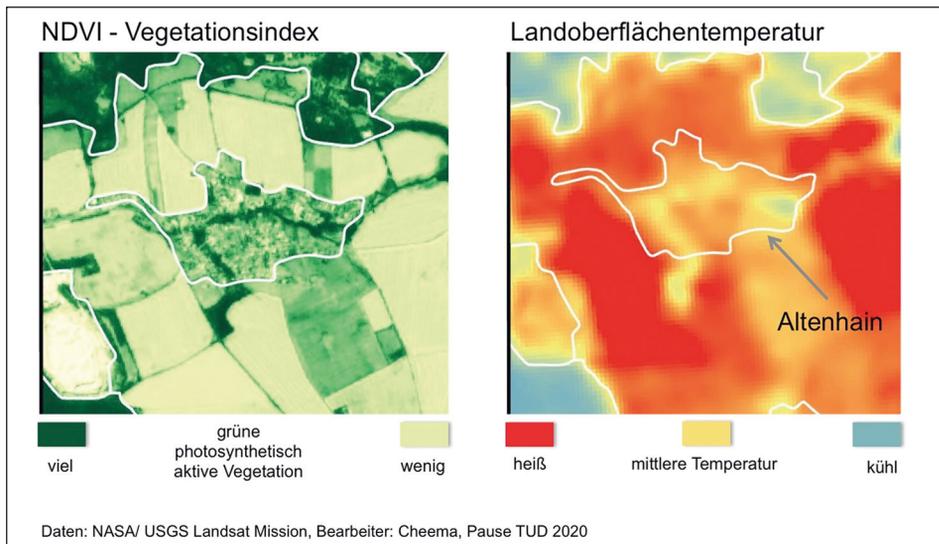


Abb.1: Exemplarische Visualisierung der GI/BI-Wirkungsketten anhand von Landsat-8-Satellitendaten, 31.7.2018 über dem Ortsteil Altenhain der Gemeinde Trebsen in Sachsen. Links: Darstellung des Vegetationsindex NDVI, Rechts: Darstellung der räumlichen Muster der Landoberflächentemperatur. Das kühlere Band (in Gelb markiert) durch die Ortschaft Altenhain ist bedingt durch den Bachlauf der Eller und dem angrenzenden Vegetationsband.

2 Beitrag Abbildender Hyperspektraldaten und Thermaldaten zum Flächenmonitoring

Im Folgenden sind ausgewählte Einsatzgebiete für HS- und TIR-Daten zusammengestellt. Die Auswahl orientiert sich an der Eignung für ein nachhaltiges Flächenmanagement im Zuge der Klimaanpassung und Erhöhung der biologischen Vielfalt unserer Landschaften und Siedlungen.

Primäre HS-Einsatzgebiete sind:

- Ökosystem-Bilanzierung und Ableitung von Biodiversitätsflächenindikatoren, z. B. in kleinräumigen Fokusgebieten und Siedlungen, Quartieren (Abb. 1)
- Qualitatives und quantitatives Monitoring von Stadtgrün (z. B. Einzelbäume zählen, beobachten und die Art ableiten)
- Monitoring des Stresszustandes von Vegetation (Stadtgrün, Bäume, Parkanlagen) (Lausch et al. 2016)
- Bewertung der Eignung von Stadtgrün im Zuge des Klimawandels
- Ermittlung und Monitoring von Maßnahmen zur Erhöhung und Sicherung biologischer Vielfalt (Cavender-Bares et al. 2020; Lausch et al. 2016)
- Lokalisierung und Monitoring funktionaler grüner Infrastruktur in Ortslagen und in der Landschaft (z. B. Hecken- und Wegbepflanzungen, Agroforstsystem) (Degerickx et al. 2020)
- Monitoring von Wasserflächen und Lokalisierung von potenziellen neuen Wasserflächen im Zuge der Klimaanpassung von Landschaften (Prosek et al. 2020)
- Ableitung von Wasserqualität
- Vegetationswassergehalt, z. B. für die Ermittlung der Waldbrandgefahr
- Bewertung der Photosyntheseleistung einer Landschaftseinheit zur Ermittlung der CO₂-Neutralität
- Ableitung von Bodeneigenschaften (Bodenfeuchte, Verfestigung, Verdichtungsgrad) in Städten (Vegetationzustand ist Proxy für Bodeneigenschaften und Verdichtungsgrad) (Lausch et al. 2019a)
- Ableitung des Versiegelungsgrads im urbanen Raum

Primäre TIR-Einsatzgebiete sind:

- Räumlich explizite Erfassung, Visualisierung und vergleichende Bewertung der Landoberflächentemperatur, z. B.
 - in Ortslagen zur Lokalisierung von Hitzeinseln
 - in der Landschaft zur Lokalisierung von Bereichen mit hohem Verlust an Bodenfeuchte

- Defizitanalyse zu grüner Infrastruktur in Siedlungen zur Temperaturregulierung
- Monitoring von Indikatoren der Bodenfeuchte (Wang et al. 2018) und Evapotranspiration (Anderson et al. 2012), z. B.
 - für das Landmanagement zur Sicherung der Grundwasserneubildung in Einzugsgebieten (Sun, Schulz 2015)
 - für das Design alternativer landwirtschaftlicher Nutzungsarten wie Agroforstsysteme
 - Verringerung der Bodendegradation

In den Kapiteln 2.1 und 2.2 sind spezifische Eigenschaften und Anforderungen an die Akquise und Analyse von HS- und TIR-Daten zusammengefasst. Insbesondere sind Unterschiede von flugzeug- und satellitenbasierten Datenprodukten aufgezeigt, da deren Berücksichtigung entscheidend für ein zielführendes Monitoring ist. Für zahlreiche Anwendungen verbessert die Kombination verschiedener Fernerkundungsbeobachtungen (physikalische Signale) die Ableitung thematischer Informationen, da dabei Synergien und Komplementaritäten gezielt in Algorithmen berücksichtigt werden können. Landnutzungs- und Vegetationsklassifikationen, basierend auf HS-Daten, können beispielsweise die Interpretation von TIR-Daten hinsichtlich Temperatur und Bodenfeuchte unterstützen.

2.1 Vorüberlegungen: Hyperspektraldaten

2.1.1 Datenverfügbarkeit

Das Satellitensegment für die regelmäßige Bereitstellung abbildender Hyperspektraldaten befindet sich bei den internationalen Erdbeobachtungsprogrammen im Aufbau. Einen aktuellen Missions- und Anwendungsüberblick bieten Lausch et al. (2019b) und Transon (2018). Die technischen Herausforderungen an die Bereitstellung zuverlässiger Signal-Rausch-Verhältnisse der großen Anzahl von Spektralkanälen (mehrere hundert spektrale Bänder) und der damit verbundenen Kalibrationsprozesse von HS-Daten waren u. a. wesentlicher Entwicklungsgegenstand der vergangenen zwei Dekaden. Im Rahmen des europäischen Erdbeobachtungsprogramms Copernicus zählt CHIME-Mission (*Copernicus Hyperspectral Imaging Mission*) zu den *High Priority Candidates* (Rast et al. 2019) und soll die Datenbasis für umweltrelevante Aufgaben und Entscheidungen unterstützen.

Für 2021 ist der Start der ersten deutschen HS-Satellitenmission EnMAP geplant (Guanter et al. 2015). EnMAP-Daten werden kostenfrei zur Verfügung stehen und können beispielsweise kostenfrei in der Software QGIS mit dem *open source plugin* EnMAP-Box bearbeitet werden. EnMAP-Daten liefern Beobachtungen spektraler

Signaturen von 420 - 2 450 nm und bieten eine räumliche Auflösung von 30 m x 30 m, d. h. es werden räumlich integrierte spektrale Eigenschaften und deren zeitliche Veränderungen in einer Raumeinheit von 30 m x 30 m erfasst. Aufgrund der hohen Anzahl einzelner Spektralkanäle können Informationen, z. B. über die Zusammensetzung verschiedener Objektklassen oder auch Artenzusammensetzung (Vegetation), abgeleitet werden und zeitlich dokumentiert werden. Aufgrund der räumlichen Auflösung von 30 m x 30 m können mit den EnMAP-Daten keine einzeln stehenden Pflanzen oder Gehölze detektiert oder gezählt werden. Die spektralen Signaturen der EnMAP-Daten erlauben die Bereitstellung neuer Informationsprodukte zu Wasserqualität (z. B. durch die Identifikation von Wasserinhaltsstoffen, Bestimmung des Chlorophyllgehaltes als Proxy für Eutrophierung), Bodenfeuchte und Vegetationswassergehalt.

Neben dem Satellitensegment stehen der behördlichen Anwendung zahlreiche flugzeuggetragene abbildende Hyperspektralsensoren zur Verfügung, welche beispielsweise an verschiedenen deutschen Forschungszentren der Helmholtz-Gemeinschaft (UFZ, GFZ, DLR) und der Hochschule Anhalt (Institut für Geoinformation und Vermessung) umfangreich und vielfältig auf verschiedenen Flugzeugen eingesetzt werden (Brosinsky et al. 2014; Lausch, Pause 2009; Ulrich et al. 2019).

2.1.2 Anforderungen an die Akquise von HS-Daten

HS-Daten zählen zu den optischen Fernerkundungsdaten und beinhalten die Erfassung der an der Erdoberfläche (Zielobjekt) reflektierten Sonnenstrahlung. Prinzipiell sind HS-Daten mit RGB-/CIR-Luftbildern und multispektralen Satellitendaten (z. B. Landsat, Sentinel-2) vergleichbar. Das entscheidende Abgrenzungsmerkmal der HS-Daten liegt in der signifikant höheren Anzahl einzelner Spektralkanäle und der damit verbundenen detaillierteren Erfassung der spektralen Signatur („spektraler Fingerabdruck“) von Objekten der Landoberfläche (z. B. Einzelbäume, Grünland, Boden, Wasseroberflächen, Dachflächen). Die Qualität der vom Sensor registrierten Strahlungsinformation ist dabei stark wetter- und tageszeitabhängig und variiert zwischen den Spektralbereichen (RGB – rot, grün, blau, NIR – nahes Infrarot, SWIR – kurzwelliges Infrarot). Die SWIR-Datenerfassung erfolgt mit einem technisch separaten Sensor, welcher über eine Kühlung verfügt und aufgrund seines Gewichts derzeit noch nicht für UAV-Anwendungen zur Verfügung steht. Damit erfordert die Aufzeichnung des Spektrum von 400 - 2 500 nm zwei individuelle Sensoren, welche i. d. R. geometrisch co-registriert werden, um dem Anwender final einen Datensatz bereitzustellen. Ideale Aufnahmezeitfenster liegen um die Mittagszeit und sollten bei Zeitreihenanalysen möglichst in ähnlichen Zeitfenstern liegen. Damit gewährleistet man optimale Signal-Rausch-Verhältnisse und Vergleichbarkeit.

Bei der Durchführung von HS-Befliegungskampagnen können während der Kampagnenplanung die exakte Anzahl und Lage der spektralen Bänder und die räumliche Auflösung

des finalen HS-Datensatzes geplant werden. Hierfür empfiehlt sich die Kampagnenplanung unter Einbindung eines erfahrenen Operators – dieser bedient i. d. R. die Sensorik im Flugzeug – um eine ideale HS-Datengrundlage für die Ableitung thematischer Informationen zu gewährleisten. Beim Einsatz von HS-Sensorik auf UAV ist zu berücksichtigen, dass insbesondere in den favorisierten Mittagsstunden eine höhere Thermik die Datenqualität durch Turbulenzen negativ beeinflussen kann. Somit sind Octocopter gegenüber Flächenflügler – UAVs besser geeignet, da diese Turbulenzen besser ausgleichen.

2.2 Vorüberlegungen: Thermaldaten

2.2.1 Datenverfügbarkeit

Die Ermittlung der Landoberflächentemperatur aus frei verfügbaren Satellitendaten (z. B. Landsat) ist in Wissenschaft, Forschung und akademischer Ausbildung mittlerweile ein Routineprozess und bietet Anwendungspotenzial für ein nachhaltiges und klimaangepasstes Landmanagement. Perspektivisch zeigen sogenannte hyperspektrale Thermaldaten ein weitreichendes Anwendungspotenzial (Manolakis et al. 2019). Neben der eigentlichen Ermittlung der Temperatur der Landoberfläche oder der bodennahen Atmosphäre ermöglichen thermale Signaturen ebenfalls oder in Ergänzung zu den HS-, RGB- oder Multispektraldaten eine Objektdifferenzierung. Der praktische Einsatz von TIR-Daten ist bisher maßgeblich im militärischen Bereich und in der Lagerstättenerkundung zu finden. Beispielsweise verfügt die Bundesanstalt für Geologie und Rohstoffe (BGR) über einen hyperspektralen TIR-Sensor (AISA OWL), mit welchem 100 Thermalkanäle erfasst werden können, um z. B. Wassereigenschaften in Seen oder Bodeneigenschaften abzuleiten.

2.2.2 Anforderungen an die Akquise von TIR-Daten

Bei der Akquise von TIR-Daten ist zu berücksichtigen, dass diese im Vergleich zu RGB- oder HS-Daten über geringere räumliche Auflösungen verfügen (z. B. Landsat 8, TIR-Pixel 100 m x 100 m). Die Ursache liegt in der geringeren Energiedichte im TIR-Spektrum und der damit verbundenen erforderlichen zeitlich längeren Signalintegration, welche sich wiederum in geringeren räumlichen Auflösungen auswirkt. Bei der Durchführung von Flugzeugkampagnen hat man auch hier Möglichkeiten für die Optimierung von Einstellungen der Sensorik („spectral and spatial binning“) und Flugparametern (z. B. Flughöhe, Fluggeschwindigkeit) und kann damit z. B. für Untersuchungsgebiete und spezifische Fragestellungen räumliche Auflösungen von wenigen Metern erzielen. Für die Umrechnung der thermalen Strahldichten in Celsiusstemperaturen benötigt man den Emissionsgrad des jeweiligen Objektes für den spezifischen TIR-Kanal. Für die

Klassifikation der Objekte können dazu wiederum HS-, RGB- oder Multispektraldaten verwendet werden. Es gibt beispielsweise auch Ansätze, welche den NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) für die Ableitung von Emissivitäten verwenden (Avdan, Jovanovska 2016).

Die Festlegung des Befliegungszeitfensters im Tagesgang ist abhängig von der Zielgröße. Für die Ableitung von Bodenfeuchteinformationen empfehlen sich die frühen Morgenstunden oder Nachtaufnahmen. Damit gewährleistet man ein TIR-Signal, welches maßgeblich die Bodeneigenschaften (Landoberfläche) repräsentiert. Für die Lokalisierung von urbanen Hitzeinseln oder die Analyse der Temperaturregulierung in Bezug zu GI/BI-Elementen innerhalb von Siedlungen können verschiedene Aufnahmezeitpunkte innerhalb eines Tages sinnvoll sein.

3 Dateneinbindung für eine nachhaltige Flächenentwicklung

HS und TIR bieten einen hohen Informationsgehalt, welcher bereits verfügbare Geodatenbestände (z. B. Digitale Geländemodelle, RGB-/CIR-Luftbilder) hervorragend ergänzt. Von großem Wert ist die Möglichkeit, einen Datensatz (z. B. von einer HS- oder TIR-Befliegung) für unterschiedliche Fragestellungen einzusetzen und damit mehrere Endverbraucher zu unterstützen. Insbesondere für die anstehenden Aufgaben im Kontext von Klimaschutz, Klimaanpassung und Erhöhung biologischer Vielfalt bieten HS- und TIR-Daten neue Informationen für die Identifikation, Monitoring, Planung, Bewertung und Dokumentation erforderlicher Maßnahmen.

Denkbar ist beispielsweise, Befliegungskampagnen in besonders gefährdeten Gebieten (z. B. aufgrund von Baumsterben, Überhitzung) und unter Einbindung verschiedener Akteure durchzuführen und Prozessketten für die Datenprozessierung bis zur Bereitstellung neuer thematischer Layer zu erproben.

Überlegenswert ist auch die Entwicklung einer *Citizen-Science*-Komponente zur Unterstützung der Inwertsetzung der Fernerkundungsdaten. Beispielsweise könnten durch Verknüpfung mit individuellen Informationen über Vegetationszustände, Arten und Pflegemaßnahmen thematische Layer der breiten Öffentlichkeit interaktiv zugänglich gemacht werden und das Bewusstsein für die Wirkung individuellen Handelns im übergeordneten Raummaßstab veranschaulicht werden.

4 Fazit

Die Bereitstellung flächendeckender neuer Fernerkundungsdaten (Rasterdaten) und daraus abgeleiteter thematischer Layer in den behördlichen Datenportalen bietet hohes und vielfältiges Anwendungspotenzial. Zentrale potenzielle Datensätze sind dabei abbildende Hyperspektral- und Thermaldaten. Für den bestehenden Bedarf in der

Bewusstseinsbildung, bei Wissensgenerierung und -transfer über Funktionen von GI/BI zur Regulierung der Landoberflächentemperatur und der damit verbundenen nachhaltigen Landnutzung und Umweltschutz (z. B. Stabilisierung des Bodenwasserhaushalts) sind Visualisierungen und thematische Informationen aus HS- und TIR-Daten ein effektives Werkzeug zur Kommunikation und Planung.

5 Literatur

- Anderson, M.C.; Allen, R. G.; Morse, A.; Kustas, W. P. (2012): Use of Landsat thermal imagery in monitoring evapotranspiration and managing water resources. *Remote Sens. Environ.* 122: 50-65.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.025>
- Avdan, U.; Jovanovska, G. (2016): Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data. *J. Sensors* 2016.
<https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- Brosinsky, A.; Lausch, A.; Doktor, D.; Salbach, C.; Merbach, I.; Gwilym-Margianto, S.; Pause, M. (2014): Analysis of Spectral Vegetation Signal Characteristics as a Function of Soil Moisture Conditions Using Hyperspectral Remote Sensing. *J Indian Soc Remote Sens* 42: 311-324.
<https://doi.org/10.1007/s12524-013-0298-8>
- Cavender-Bares, J.; Gamon, J. A.; Townsend, P. A. (Eds.) (2020): *Remote Sensing of Plant Biodiversity*. Springer International Publishing, Cham.
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-33157-3>
- Degerickx, J.; Hermy, M.; Somers, B. (2020): Mapping Functional Urban Green Types Using High Resolution Remote Sensing Data. *SUSTAINABILITY* 12.
<https://doi.org/10.3390/su12052144>
- Guanter, L.; Kaufmann, H.; Segl, K.; Foerster, S.; Rogass, C.; Chabrillat, S.; Kuester, T.; Hollstein, A.; Rossner, G.; Chlebek, C.; Straif, C.; Fischer, S.; Schrader, S.; Storch, T.; Heiden, U.; Mueller, A.; Bachmann, M.; Hostert, P.; van der Linden, S.; Leitão, P.; Rabe, A.; Doerffer, R.; Krasemann, H.; Xi, H.; Mauser, W.; Hank, T.; Locherer, M.; Rast, M.; Staenz, K.; Sang, B. (2015): The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission for Earth Observation. *Remote Sens.* 7: 8830-8857.
<https://doi.org/10.3390/rs70708830>
- Lausch, A.; Baade, J.; Bannehr, L.; Borg, E.; Bumberger, J.; Chabrillat, S.; Dietrich, P.; Gerighausen, H.; Glässer, C.; Hacker, J. M.; Haase, D.; Jagdhuber, T.; Jany, S.; Jung, A.; Karnieli, A.; Kraemer, R.; Makki, M.; Mielke, C.; Möller, M.; Mollenhauer, H.; Montzka, C.; Pause, M.; Rogass, C.; Rozenstein, O.; Schnullius, C.; Schrodth, F.; Schrön, M.; Schulz, K.; Schütze, C.; Schweitzer, C.; Selsam, P.; Skidmore, A. K.; Spengler, D.; Thiel, C.; Truckenbrodt, S. C.; Vohland, M.; Wagner, R.; Weber, U.; Werban, U.; Wollschläger, U.; Zacharias, S.; Schaepman, M. E. (2019a): Linking Remote Sensing and Geodiversity and Their Traits Relevant to Biodiversity – Part I: Soil Characteristics. *Remote Sens.* 11: 2356.
<https://doi.org/10.3390/rs11202356>

- Lausch, A.; Baade, J.; Bannehr, L.; Borg, E.; Bumberger, J.; Chabrilliat, S.; Dietrich, P.; Gerighausen, H.; Glässer, C.; Hacker, J. M.; Haase, D.; Jagdhuber, T.; Jany, S.; Jung, A.; Karnieli, A.; Kraemer, R.; Makki, M.; Mielke, C.; Möller, M.; Mollenhauer, H.; Montzka, C.; Pause, M.; Rogass, C.; Rozenstein, O.; Schmullius, C.; Schrodt, F.; Schrön, M.; Schulz, K.; Schütze, C.; Schweitzer, C.; Selsam, P.; Skidmore, A. K.; Spengler, D.; Thiel, C.; Truckenbrodt, S. C.; Vohland, M.; Wagner, R.; Weber, U.; Werban, U.; Wollschläger, U.; Zacharias, S.; Schaepman, M. E. (2019b): Linking Remote Sensing and Geodiversity and Their Traits Relevant to Biodiversity – Part I: Soil Characteristics. *Remote Sens.* 11.
<https://doi.org/10.3390/rs11202356>
- Lausch, A.; Bannehr, L.; Beckmann, M.; Boehm, C.; Feilhauer, H.; Hacker, J. M.; Heurich, M.; Jung, A.; Klenke, R.; Neumann, C.; Pause, M.; Rocchini, D.; Schaepman, M. E.; Schmidlein, S.; Schulz, K.; Selsam, P.; Settele, J.; Skidmore, A. K.; Cord, A. F. 2016. Linking Earth Observation and taxonomic, structural and functional biodiversity: Local to ecosystem perspectives. *Ecol. Indic.* 70: 317-339.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2016.06.022>
- Lausch, A.; Erasmi, S.; King, D. J.; Magdon, P.; Heurich, M. (2016): Understanding Forest Health with Remote Sensing-Part I – A Review of Spectral Traits, Processes and Remote-Sensing Characteristics. *Remote Sens.* 8: 1029.
<https://doi.org/10.3390/rs8121029>
- Lausch, A.; Pause, M. (2009): Skalenspezifische hyperspektrale Fernerkundung mit dem Airborne Imaging Spectrometer for Application (AISA-EAGLE/HAWK 400-2500nm). *DGPF Tagungsband 18*: 287-294.
- Manolakis, D.; Pieper, M.; Truslow, E.; Lockwood, R.; Weisner, A.; Jacobson, J.; Cooley, T. (2019): Longwave Infrared Hyperspectral Imaging Principles, progress, and challenges. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag.* 7: 72-100.
<https://doi.org/10.1109/MGRS.2018.2889610>
- Prosek, J.; Gdulova, K.; Bartak, V.; Vojar, J.; Solsky, M.; Rocchini, D.; Moudry, V. (2020): Integration of hyperspectral and LiDAR data for mapping small water bodies. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 92.
<https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102181>
- Rast, M. (2019): Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment – Mission Requirements Document.
- Sun, L.; Schulz, K. (2015): The Improvement of Land Cover Classification by Thermal Remote Sensing. *Remote Sens.* 7: 8368-8390.
<https://doi.org/10.3390/rs70708368>
- Transon, J. (2018): Survey of Hyperspectral Earth Observation Applications from Space in the Sentinel-2 Context. *Remote Sens.* 8: 1-32.
<https://doi.org/10.3390/rs10020157>
- Ulrich, C.; Bannehr, L.; Hupfer, M.; Schulze, M. (2019): Entwicklung von Indizes zur Ableitung der Eisenkonzentration verockerter Fließgewässer mittels hyperspektraler VNIR- und SWIR-Daten. *Publ. der Dtsch. Gesellschaft für Photogramm. Fernerkundung und Geoinf. e. V.*: 558-571.

Wang, Y.; Peng, J.; Song, X.; Leng, P.; Ludwig, R.; Loew, A. (2018): Surface Soil Moisture Retrieval Using Optical/Thermal Infrared Remote Sensing Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*: 1-10.
<https://doi.org/10.1109/TGRS.2018.2817370>