

MOOC Dokument

Beyond the Visible – Einführung in die hyperspektrale Fernerkundung

- 01** Willkommen
- 02** Einstiegstest: Bereit für die hyperspektrale Fernerkundung?
- 03** Grundlagen der abbildenden Spektroskopie
- 04** Grundlagen der Sensortechnologien und Datenerfassungstechniken
- 05** Praktisches Training: Daten und Software
- 06** Auf Wiedersehen

Danksagung

Autorinnen:

Arlena Brosinsky, Charlotte Wilczok, Saskia Foerster | GFZ Potsdam

Mitwirkende: (in alphabetischer Reihenfolge)

Alison Beamish, David Beamish, Katja Berger, Mathias Bochow, Michael Bock, Tobias Burger, Astrid Bracher, Brennda Braga, Maximilian Brell, Sabine Chabrilat, Antonia Cozacu, Helge Daempfling, Fabian Faßnacht, Sebastian Fischer, Claudia Giménez Poblador, Tobias Hank, Benedikt Hartweg, Heinrich Hecht, Kai Heckel, Christina Hohmann, Andreas Hueni, Benjamin Jakimow, Nicole Köllner, Katrin Koch, Theres Kuester, Ettore Lopinto, Christopher Loy, Marcel Ludwig, Sylvia Magnussen, Marco Maier, Sara Makdessi, Elina Mevenkamp, Pauline Müller, Nicole Pinnel, Anke Schickling, Karl Segl, Tino Sieland, Mariana Soppa, Stefanie Steinhauser, Tobais Storch, Fabian Thiel, Sebastian van der Linden, Matthias Woher, Shanyu Zhou, Nora Meyer zu Erpen

Technische Koordinierung:

Robert Eckardt | Friedrich-Schiller-Universität Jena, EOS

Version: 1.0 (Kursversion 3.0)

Urheberrecht: Sofern nicht anders angegeben, wird der Kursinhalt kostenlos unter einer Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License CC BY-SA 4.0 zur Verfügung gestellt.



Zitieren als: A. Brosinsky, C. Wilczok, S. Foerster (2025). **Beyond the Visible – Einführung in die hyperspektrale Fernerkundung.** Offline-Dokument zum MOOC. HYPERedu, EnMAP education initiative, DeutschesGeoForschungszentrum GFZ; ursprünglich veröffentlicht November 2021, 2nd revision November 2022. 10.48440/enmap.2024.002

Inhaltsverzeichnis

1 Willkommen	8
1.1 Hyperspektral, na und?	11
1.2 EnMAP – Die deutsche Hyperspektral-Satellitenmission	17
2 Vorab-Einschätzung: Bereit für die hyperspektrale Fernerkundung?	18
Vorab-Einschätzungs-Quiz.....	18
3 Grundlagen der abbildenden Spektroskopie.....	21
3.1 Was ist abbildende Spektroskopie?	21
3.2 Wichtige Meilensteine.....	23
Quiz: Wichtige Meilensteine	25
3.3 Elektromagnetische Strahlung	26
Quiz: Elektromagnetische Strahlung (EMR)	35
3.4 Interaktion von EMR mit der Atmosphäre	36
Quiz: Interaktion von EMR mit der Atmosphäre.....	39
3.5 Interaktion von EMR mit dem Ziel.....	40
Quiz: Interaktion von EMR mit dem Ziel	44
3.6 Spektraler Reflexionsgrad ausgewählter Oberflächenmaterialien	45
Quiz: Spektraler Reflexionsgrad ausgewählter Oberflächenmaterialien	49
3.7 Ressourcen-Abschnitt: Lektion “Grundlagen der abbildenden Spektroskopie“	51
Finales Quiz: Lektion ‘Grundlagen der abbildenden Spektroskopie’	54
4 Grundlagen der Sensortechnologien und Datenerfassungstechniken	57
4.1 Einführung in die Sensortechnologien	58
4.2 Dateneigenschaften - die 4 Auflösungen	60
Quiz: Dateneigenschaften – die 4 Auflösungen	68
4.3 Abbildende Spektroradiometer – allgemeine Elemente.....	70
Quiz: Abbildende Spektroradiometer – allgemeine Elemente.....	72
4.4 Datenerfassung: weltraumgestützt.....	73
Quiz: Datenerfassung: weltraumgestützt.....	77
4.5 Datenerfassung: luftgestützt.....	78
Quiz: Datenerfassung: luftgestützt.....	80
4.6 Datenerfassung: bodengestützt	81
Quiz: Datenerfassung: bodengestützt.....	84

4.7 Datenprodukt	85
Quiz: Datenprodukt	88
4.8 Ressourcen-Abschnitt: Lektion „Grundlagen der Sensortechnologien und Datenerfassungstechniken“	89
Finales Quiz: Lektion „Grundlagen der Sensortechnologien und Datenerfassungstechniken“	93
5 Praktisches Training: Daten und Software	96
5.1 Von der Forschungsfrage zum Endprodukt	97
5.2 Datenquellen: weltraumgestützt	98
Quiz: Datenquellen: weltraumgestützt	102
5.3 Datenquellen: luftgestützt	103
Quiz: Datenquellen: luftgestützt	106
5.4 Datenquellen: Spektralbibliotheken	107
Quiz: Datenquellen: Spektralbibliotheken	112
5.5 Vorverarbeitung der Daten	113
Quiz: Vorverarbeitung der Daten	115
5.6 Methoden und Software	117
Quiz: Methoden & Software	120
5.7 Einführung in die EnMAP-Box	121
5.8 Ressourcen-Abschnitt: Lektion „Praktisches Training : Daten & Software“	123
Finales Quiz: Lektion „Praktisches Training: Daten und Software“	128
6 Auf Wiedersehen!.....	131
6.1 Abschließende Nutzer:innenumfrage	131
6.2 Abschlussprüfung	131
Abschlussprüfung	132
6.3 Auf Wiedersehen!	137
6.4 Making of!	138

Abkürzungsverzeichnis

Diese Liste enthält alle Begriffe, die in dem MOOC eingeführt werden

ACT: Across-track (<i>Quer zur Flugrichtung</i>)	ISS: International Space Station (<i>Internationale Raumstation</i>)
A/D: analog/digital	JHU: Johns Hopkins University
AIS: Airborne Imaging Spectrometer (<i>Luftgestütztes abbildendes Spektrometer</i>)	JPL: Jet Propulsion Laboratory
ALT: Along-track (<i>Entlang der Flugrichtung</i>)	LAI: Leaf area index (<i>Blattflächenindex, gibt die Blattfläche pro Bodenoberfläche an</i>)
AO: Announcement of Opportunity	LEO: Low Earth Orbit (<i>Erdnahe Umlaufbahn</i>)
API: Application programming interface (<i>Schnittstelle zur Anwendungsprogrammierung</i>)	LUCAS: Land Use/Cover Area frame statistical Survey (<i>Ein Programm der EU zur Überwachung von Landnutzung und Landbedeckung</i>)
ASD: Analytical Spectral Devices	MF: Magnetic field (<i>Magnetisches Feld</i>)
AVIRIS-NG: Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer – Next Generation	MIR: Mid infrared (<i>Mittleres Infrarot</i>)
BRDF: Bidirectional Reflectance Distribution Function (<i>Bi-direktionale Reflexionsverteilungsfunktion</i>)	MOOC: Massive open online course (<i>Online-Kurs, der von vielen Menschen belegt werden kann</i>)
CHIME: Copernicus Hyperspectral Imaging Mission of the Environment (<i>Hyperspektrale Satellitenmission der ESA im Rahmen von Copernicus (geplant für 2028/29)</i>)	MTF: Modulation transfer function (<i>Modulationsübertragungsfunktion, quantifiziert die Menge des vom Objekt auf ein Pixel übertragenen Kontrasts</i>)
CP: Commissioning phase (<i>Phase der Inbetriebnahme</i>)	NASA: National Aeronautics and Space Administration
	NIR: Near-infrared (<i>Nahes Infrarot</i>)

- CRAD:** Continuum Removed Absorption Depth (*Maß für die Tiefe eines Absorptionsmerkmals, berechnet durch das Entfernen des Kontinuums*)
- DEM:** Digital elevation model (*Digitales Höhenmodell*)
- DLR:** German Aerospace Center (*Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt*)
- DN:** Digital number (*Digitale Nummer*)
- EeTeS:** EnMAP end-to-end simulator (*Ein Simulationswerkzeug, das realistische EnMAP-ähnliche Daten generiert*)
- EnMAP:** Environmental Mapping and Analysis Program (*Die deutsche Hyperspektral-Satellitenmission*)
- EM:** Electromagnetic (*Elektromagnetisch*)
- EMR:** Electromagnetic radiation (*Elektromagnetische Strahlung*)
- EM:** Endmember (*Material, welches als Referenzspektrum für die spektrale Analyse dient*)
- EF:** Electrical field (*Elektrisches Feld*)
- ESA:** European Space Agency (*Europäische Weltraumorganisation*)
- FIR:** Far infrared (*Fernes Infrarot*)
- FOV:** Field-of-view (*Sichtfeld, der Winkel, der mit einem optischen Instrument erfasst werden kann*)
- PRISMA:** PRecursores IperSpettrale della Missione Applicativa (*Hyperspektraler Erdbeobachtungssatellit der italienischen Raumfahrtbehörde*)
- PSF:** Point spread function (*Die Punktspreizfunktion beschreibt wie ein punktförmiges Objekt durch ein System abgebildet wird*)
- RGB:** Red Green Blue (*Rot-Grün-Blau*)
- RMSE:** Root Mean Square Error (*Wurzel des mittleren quadratischen Fehlers*)
- RTM:** Radiative Transfer Model (*Das Strahlungstransfermodell beschreibt die Wechselwirkung von EM-Strahlung mit der Atmosphäre und/oder der Erdoberfläche*)
- SAM:** Spectral Angle Mapper (*physikalisch basierte spektrale Klassifikation, die einen n-dimensionalen Winkel nutzt, um Pixel mit Referenzspektren abzugleichen*)
- SBG:** NASA's Surface Biology and Geology Investigation Mission (*US-Amerikanische hyperspektrale Satellitenmission (geplant für 2028/29)*)
- SFA:** Spectral Feature Analysis (*Analyse spektraler Merkmale*)
- SFF:** Spectral Feature Fitting (*Methode zur Anpassung von Bildspektren an Referenzspektren mithilfe der Methode der kleinsten Quadrate*)

FQR: Flight qualification review <i>(Flugqualifikationsprüfung)</i>	SMA: Spectral Mixing Analysis <i>(Identifikation von Materialien aus Mischspektren anhand ihrer spektralen Signaturen)</i>
FWHM: Full width at half maximum <i>(Die Breite der spektralen Bänder bei halbem Maximum)</i>	SNR: Signal-to-noise ratio <i>(Verhältnis von Signal zu Rauschen als Maß für die radiometrische Qualität)</i>
GFZ: German Research Centre for Geosciences <i>(Deutsches GeoForschungs-Zentrum)</i>	SSD: Spatial sampling distance <i>(Räumlicher Abtastabstand)</i>
GIFOV: Ground-projected instantaneous-field-of-view <i>(Der maximale Bodenbereich, der von einem Sensorelement erfasst werden kann)</i>	SVM: Support Vector Machine <i>(Auswertalgorithmus, der für die überwachte Bildklassifizierung oder Regression)</i>
GSD: Ground sampling distance <i>(Bodenabtastabstand, beschreibt den Abstand zwischen den Pixelzentren am Boden)</i>	SWIR: Short wave infrared <i>(kurzwelliges Infrarot)</i>
GSI: Ground sampling interval <i>(Bodenabtastintervall)</i>	TIR: Thermal infrared <i>(Thermales Infrarot)</i>
IFOV: Instantaneous-field-of-view <i>(Das momentane Sichtfeld ist der Winkelbereich, der von einem einzelnen Detektorelement gesehen wird)</i>	TOA: Top-of-Atmosphere <i>(am oberen Rand der Atmosphäre)</i>
IR: Infrared <i>(Infrarot)</i>	UV: Ultraviolett
	USGS: United States Geological Survey <i>(Wissenschaftliche Behörde für amtliche Kartografie in den USA)</i>
	VIS: Visible (light) <i>(sichtbarer Bereich des EM_Spektrums)</i>
	VNIR: Visible near-infrared <i>(Kombination des sichtbaren und nahen Infrarotbereichs)</i>

1 Willkommen

Hallo und herzlich willkommen zum Massive Open Online Course (MOOC) „Beyond the Visible – Einführung in die hyperspektrale Fernerkundung“!

Dieser Kurs ist in **sechs Lektionen gegliedert**, die in der Regel **mehrere Themen enthalten** und von einer Reihe kurzer Übungen und Quizfragen begleitet und abgeschlossen werden.

Die erste Lektion ist für alle zugänglich - hier erläutern unsere Kolleg:innen die Vorteile von Hyperspektraldaten gegenüber anderen Arten von Fernerkundungsdaten sowie die Herausforderungen und Möglichkeiten für ihre jeweiligen Fachgebiete: Boden und Geologie, Landwirtschaft und Wasser. Außerdem kannst du einen ersten Blick auf EnMAP werfen, die deutsche Hyperspektral-Satellitenmission, die der Auslöser für die Erstellung dieses MOOCs war! Diese Lektion ist nicht verpflichtend, um den MOOC abzuschließen, aber wir hoffen, dass du in den Interviews einige wertvolle Informationen zu Deinen Interessengebieten findest.

Die zweite Lektion ist ein Quiz über die grundlegenden Aspekte der Fernerkundung, welches Du bestehen musst, um Zugang zum Rest des Kurses zu erhalten - dies soll dich nicht entmutigen, sondern sicherstellen, dass du genügend Vorwissen hast, um diesen MOOC zu genießen. Keine Sorge, du hast eine unbegrenzte Anzahl von Versuchen, um das Quiz zu bestehen ...

Die dritte bis fünfte Lektion umfassen den eigentlichen Inhalt und führen dich in die Grundlagen der abbildenden Spektroskopie ein, geben dir Informationen zu Sensortechnologien und Datenerfassung und stellen eine Reihe von kostenlosen Datenressourcen sowie Software vor. In der letzten Lektion hast du die Möglichkeit, selbst Hyperspektralbilder herunterzuladen und/oder zu verarbeiten.

Diese thematischen „Kern“-Lektionen (3-5) enthalten viele interaktive Inhalte, und am **Ende jeder Lektion** musst du ein **kurzes Abschluss-Quiz bestehen** (jeweils 10 Fragen). In jedem abschließenden Lektions-Quiz (3) musst du **mindestens 50 % erreichen**, um in die nächste Lektion zu gelangen. Der **Kurs wird mit einer Abschlussprüfung abgeschlossen**, welche insgesamt 15 Fragen umfasst. Hier musst du **mindestens 70 % erreichen**, um zu bestehen. **Wenn du die Abschlussprüfung erfolgreich absolviert hast, erhältst du dein Abschlusszertifikat!** Du hast eine **unbegrenzte Anzahl an Versuchen, alle Quizze zu bestehen**.

Diese Offline-Version des Basis-MOOCs ermöglicht es allen, auf die Inhalte zuzugreifen - um den Kurs erfolgreich abzuschließen und das Abschlusszertifikat zu erwerben, musst du jedoch die Lektions-Quizze sowie die Abschlussprüfung **online** bestehen.

Wir nutzen **die sechste Lektion**, um uns zu verabschieden - bis dahin solltest du gelernt haben ...

- was abbildende Spektroskopie ist
- für welche Anwendungsbereiche sie nützlich ist
- was der physikalische Hintergrund ist
- welche Sensoren üblicherweise verwendet werden
- wie Spektroskopiedaten erfasst werden
- woher man Daten erhalten kann
- welche Software verwendet werden kann
- und schließlich erste Verarbeitungsschritte zur Analyse der Daten

Ratschlag – wie du den Kurs reibungslos absolvieren kannst

Dieser Kurs wurde für die Teilnahme an einem Desktop-PC oder Laptop konzipiert, obwohl die meisten Inhalte auch auf einem Tablet oder sogar einem Smartphone funktionieren sollten. Für eine optimale Lernerfahrung empfehlen wir die Teilnahme mit Google Chrome, Microsoft Edge oder Mozilla Firefox auf einem Desktop-PC oder Laptop. Während des Betatests haben wir einige Probleme mit Safari festgestellt - wenn der Inhalt nicht richtig angezeigt wird, versuche ihn neu zu laden. **Um den Kurs abzuschließen und das Zertifikat zu erhalten, musst du die Quizfragen in der Online-Version des Kurses beantworten.**

VIDEO: Basic-01: Beyond the Visible – Welcome! (*Beyond the Visible: Willkommen*)



Video-URL: <https://youtu.be/qXDVoMy-fgU>

Beginnen wir mit dem ersten Thema dieser "Willkommen!"-Lektion. Drei Expert:innen aus drei verschiedenen Anwendungsbereichen werden in motivierenden Interviews erklären, warum die hyperspektrale Fernerkundung so aufregend und revolutionär ist.

1.1 Hyperspektral, na und?

... was ist also der tatsächliche Nutzen von Hyperspektraldaten? Wir haben drei Kolleg:innen, Expert:innen auf den Gebieten der abbildenden Spektroskopie von Böden und Geologie, Landwirtschaft sowie Binnen- und Küstengewässern, gefragt, was sie über die Vorteile der hyperspektralen Bildgebung denken und was ihrer Meinung nach die aktuellen Herausforderungen für ihre jeweiligen Interessengebiete sind. Klicke auf die folgenden Videos, um die **Interviews** zu sehen.



Prof. Dr. Sabine Chabrilat (Deutsches GeoForschungsZentrum - GFZ in Potsdam, Professorin für "Digitale Bodenkartierung" an der Leibniz Universität Hannover, Institut für Bodenkunde) über abbildende Spektroskopie im Kontext von **Böden und Geologie**.

VIDEO: Basic-02: Expert interview: application field "soils and geology"



URL of the video:
<https://www.youtube.com/watch?v=g6zSSjBK1Vk>

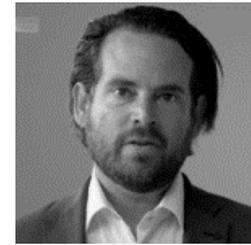


Prof. Dr. Astrid Bracher (Alfred-Wegener-Institut für Polar- und Meeresforschung - AWI in Bremerhaven, Honorarprofessorin an der Universität Bremen, Fachbereich Physik und Elektrotechnik) über abbildende Spektroskopie im Kontext von **Binnen- und Küstengewässern**.

VIDEO: Basic-03: Expert interview: application field "inland & coastal waters"



URL of the video:
<https://www.youtube.com/watch?v=LINaeuvmO9E>



PD Dr. Tobias B. Hank (Ludwig-Maximilians-Universität München, Institut für Geographie) über abbildende Spektroskopie im Kontext der **Landwirtschaft**.

VIDEO: Basic-04: Expert interview: application field "agriculture"



URL of the video:
<https://www.youtube.com/watch?v=DaZF3jRnMfs>

Unsere Expert:innen haben aktuelle Literatur und eigene Publikationen zur weiteren Lektüre ausgewählt, einschließlich derjenigen, die in den Interviews erwähnt wurden.

Böden und Geologie:

Überblicksliteratur zum Stand der Technik:

Chabrilat S., Ben-Dor E., Cierniewski J., Gomez C., Schmid T., van Wesemael B. (2019): **Imaging Spectroscopy for Soil Mapping and Monitoring**. *Surveys in Geophysics*. 40, 361–399. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09524-0>

Ben-Dor, E., Irons, J. R., & Epema, G. F. (1999): **Soil reflectance**. *Remote sensing for the earth sciences: Manual of remote sensing*, 3, 111-188.

Demattê, J. A. M., Morgan, C. L. S., Chabrilat, S., Rizzo, R., Franceschini, M. H. D., Vasques, G. M. & Thenkabail, P. S. (2015): **Spectral sensing from ground to space in soil science: State of the art, applications, potential and perspectives**. In *Land resources monitoring, modeling, and mapping with remote sensing* (pp. 661-732). CRC Press.

Cudahy, T. (2016): **Mineral Mapping for Exploration: An Australian Journey of Evolving Spectral Sensing Technologies and Industry Collaboration**. *Geosciences* 6, 52. <https://doi.org/10.3390/geosciences6040052>

Krupnik, D., Khan, S., (2019): **Close-range, ground-based hyperspectral imaging for mining applications at various scales: Review and case studies**. *Earth-Science Rev.* 198, 102952. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102952>

van der Meer, F. 1998): **Imaging spectrometry for geological remote sensing**. *Geologie en Mijnbouw* 77, 137–151. <https://doi.org/10.1023/A:1003538401892>

Clark, R.N., T.V.V. King, M. Kleijwa, G.A. Swayze & N. Vergo (1990): **High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals**. *J. Geophys. Res.* 95: 12653-12680

Eigene Publikationen:

Chabrilat S., Guillaso S., Rabe A., Foerster S., Guanter L. (2016): **From HYSOMA to ENSOMAP—a new open source tool for quantitative soil properties mapping based on hyperspectral imagery from airborne to spaceborne applications**. General Assembly European Geosciences Union, Vienna, Austria, 2016, *Geophysical Research Abstracts*, Vol 18, EGU2016-14697

Chabrilat S., Eisele A., Guillaso S., Rogaß C., Ben-Dor E., Kaufmann H. (2011): **HYSOMA: an easy-to-use software interface for soil mapping applications of hyperspectral imagery**. In: *Proceedings 7th EARSeL SIG imaging spectroscopy workshop*, Edinburgh, Scotland

Guanter L., Kaufmann H., Segl K., Foerster S., Rogass C., Chabrilat S., Kuester T., Hollstein A., Rossner G., Chlebek C., Straif C., Fischer S., Schrader S., Storch T., Heiden U., Mueller A., Bachmann M., Mühle H., Müller R., Habermeyer M., Ohndorf A., Hill J., Buddenbaum H., Hostert P., Van der Linden S., Leitão P.J., 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.* 2015, 7(7), 8830-8857. <https://doi.org/10.3390/rs70708830>

Mielke C., Rogaß C., Bösche N., Segl K., Altenberger U. (2016): **EnGeoMAP 2.0—Automated Hyperspectral Mineral Identification for the German EnMAP Space Mission**. Remote Sensing, 8, 2, 127. <https://doi.org/10.3390/rs8020127>

Steinberg A., Chabrillat S., Stevens A., Segl K., Foerster S. (2016): **Prediction of Common Surface Soil Properties Based on Vis-NIR Airborne and Simulated EnMAP Imaging Spectroscopy Data: Prediction Accuracy and Influence of Spatial Resolution**. – Remote Sensing, 8, 7, 613. <https://doi.org/10.3390/rs8070613>

Ward K.J., Chabrillat S., Brell M., Castaldi F., Spengler D., Foerster S. (2020): **Mapping Soil Organic Carbon for Airborne and Simulated EnMAP Imagery Using the LUCAS Soil Database and a Local PLSR**. Remote Sensing, 12(20), 3451. <https://doi.org/10.3390/rs12203451>

Landwirtschaft:

Überblicksliteratur zum Stand der Technik:

Hank T., Berger K., Bach H., Clevers J.G.P.W., Gitelson A., Zarco-Tejada P., Mauser W. (2019): **Spaceborne Imaging Spectroscopy for Sustainable Agriculture: Contributions and Challenges**. Surveys in Geophysics, 40, 515-551. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9492-0>

Ustin, S.L., & Middleton, E.M. (2021): **Current and near-term advances in Earth observation for ecological applications**. Ecological Processes, 10, 1. <https://doi.org/10.1186/s13717-020-00255-4>

Verrelst, J., Malenovský, Z., Van der Tol, C., Camps-Valls, G., Gastellu-Etchegorry, J.-P., Lewis, P., North, P., & Moreno, J. (2019): **Quantifying Vegetation Biophysical Variables from Imaging Spectroscopy Data: A Review on Retrieval Methods**. Surveys in Geophysics, 40, 589-629. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9478-y>

Weiss, M., Jacob, F., & Duveiller, G. (2020): **Remote sensing for agricultural applications: A meta-review**. Remote Sensing of Environment, 236, 111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>

Eigene Publikationen:

Berger K., Verrelst J., Féret J.-B., Hank T., Wocher M., Mauser W., Camps-Valls G. (2020): **Retrieval of aboveground crop nitrogen content with a hybrid machine learning method**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 92, 102174. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102174>

Berger K., Verrelst J., Féret J.-B., Wang Z., Wocher M., Strathmann M., Danner M., Mauser W., Hank T. (2020): **Crop nitrogen monitoring: Recent progress and principal developments in the context of imaging spectroscopy missions**. Remote Sensing of Environment, 242, 111758. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111758>

Berger K., Wang Z., Danner M., Wocher M., Mauser W., Hank T. (2018): **Simulation of Spaceborne Hyperspectral Remote Sensing to Assist Crop Nitrogen Content Monitoring in Agricultural Crops**. In, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 3801-3804). Valencia, Spain. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518537>

Danner M., Berger K., Wocher M., Mauser W., Hank T. (2021): **Efficient RTM-based training of machine learning regression algorithms to quantify biophysical & biochemical traits of agricultural crops**. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 173, 278-296. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2021.01.017>

Danner M., Wocher M., Berger K., Mauser W., Hank T. (2018): **Developing a Sandbox Environment for Prosail, Suitable for Education and Research**. In, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 783-786). Valencia, Spain. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8519378>

Wocher M., Berger K., Danner M., Mauser W., Hank T. (2020): **RTM-based dynamic absorption integrals for the retrieval of biochemical vegetation traits**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 93, 102219. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102219>

Wocher M., Berger K., Danner M., Mauser W., Hank T. (2018): **Hyperspectral Retrieval of Canopy Water Content Through Inversion of the Beer-Lambert Law**. In, IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (pp. 3805-3808). Valencia, Spain. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8518218>

Binnen- und Küstengewässer:

Überblicksliteratur zum Stand der Technik

Giardino, C., Brando, V.E., Gege, P. et al. (2019): **Imaging Spectrometry of Inland and Coastal Waters: State of the Art, Achievements and Perspectives**. Surv Geophys 40, 401-429. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9476-0>

Hestir EL, Brando VE, Bresciani M, Giardino C, Matta E, Villa P, Dekker AG (2015): **Measuring freshwater aquatic ecosystems: the need for a hyperspectral global mapping satellite mission**. Remote Sens Environ 167:181-195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.05.023>

Martin, S. (2014): **An Introduction to Ocean Remote Sensing (2nd ed.)**. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1017/CBO9781139094368

Mobley, C. D. (1994): **Light and water: Radiative transfer in natural waters**. San Diego: Academic Press.

International Ocean Colour Coordinating Group: <http://www.ioccg.org/>

Eigene Publiktionen:

Alvarado L., Gege P., Losa S.N., Soppa M.A., Dröscher I., Bracher A. (2021): **Phytoplankton functional types retrieval for Lake Constance: evaluation of Desis and OLCI satellite retrievals with field observations**. DESIS Workshop: https://desis2021.welcome-manager.de/archiv/web/userfiles/desis2021/Alvarado_DESISWorkshop_vf.pdf

Bracher A., Soppa M. A., Gege P., Losa S.N., Silva B., Steinmetz F., Dröscher, I. (2021): **Extension of atmospheric correction Polymer to hyperspectral sensors: application to HICO data and first results for DESIS data**. Proceedings of the IGARSS 2021 – 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium; article identifier: IG213516

Bracher A., Xi H., Dinter T., Mangin A., Strass V. H., von Appen W.-J., Wiegmann S. (2020): **High resolution water column phytoplankton composition across the Atlantic Ocean from**

ship-towed vertical undulating radiometry. *Frontiers in Marine Science* 7: 235.
<https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00235>

Bracher A., Bouman H. A., Bricaud A., Brewin R.W.J., et al. (2017): **Obtaining Phytoplankton Diversity from Ocean Color: A Scientific Roadmap for Future Development.** *Frontiers in Marine Science*. 4: 00055. <https://doi.org/10.3389/fmars.2017.00055>

Bracher A., Vountas M., Dinter T., Burrows J.P., Röttgers R., Peeken I. (2009): **Quantitative observation of cyanobacteria and diatoms from space using PhytoDOAS on SCIAMACHY data.** *Biogeosciences*. 6: 751-764. <https://doi.org/10.5194/bg-6-751-2009>

Dierssen H., Bracher A., Brando V., Loisel H., Ruddick K. (2020): **Data needs for hyperspectral detection of algal bloom diversity across the globe.** *Oceanography* 33(1): 74-79.
<https://doi.org/10.5670/oceanog.2020.111>

Hieronymi M. (2019): **Spectral band adaptation of ocean color sensors for applicability of the multi-water biogeo-optical algorithm ONNS.** *Opt. Express*. 27, A707-A724.
<https://doi.org/10.1364/OE.27.00A707>

Sadeghi A., Dinter T., Vountas M., Taylor B., Altenburg Soppa M., Bracher, A. (2011): **Remote sensing of coccolithophore blooms in selected oceanic regions using the PhytoDOAS method applied to hyper-spectral satellite data,** *Biogeosciences Discussion*. 8, 11725-11765. <https://doi.org/10.5194/bgd-8-11725-2011>

Soppa M. A., Silva B., Steinmetz F., Keith D., Scheffler D., Bohn N., Bracher A. (2021): **Assessment of Polymer atmospheric correction algorithm for hyperspectral remote sensing imagery over coastal waters.** *Sensors*, 21, 4125. <https://doi.org/10.3390/s21124125>

Soppa M.A., Dinh D.A., Silva B., Steinmetz F., Alvarado L., Bracher A. (2021a): **Intercomparison of DESIS, Sentinel-2 (MSI) and Sentinel-3 (OLCI) data for water colour applications.** DESIS Workshop: https://desis2021.welcome-manager.de/front/content.php?id_article=533

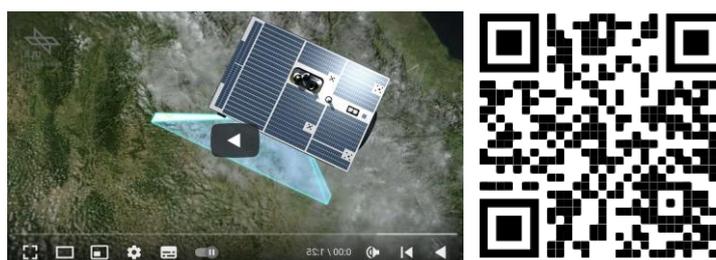
Wolanin A., Soppa M. A., Bracher A. (2016): **Investigation of spectral band requirements for improving retrievals of phytoplankton functional types.** *Remote Sensing*. 8: 871.
<https://doi.org/10.3390/rs8100871>

1.2 EnMAP – Die deutsche Hyperspektral-Satellitenmission

„EnMAP“ wurde gerade von unseren drei Expert:innen erwähnt. **Das Environmental Mapping and Analysis Program (EnMAP) ist eine deutsche Hyperspektral-Satellitenmission**, die darauf abzielt, die Umwelt der Erde zu überwachen und zu charakterisieren, indem sie die regionale Abdeckung im globalen Maßstab nutzt. EnMAP misst und modelliert entscheidende dynamische Prozesse in den Ökosystemen der Erde, indem es geochemische, biochemische und biophysikalische Parameter erfasst, die Informationen über den Zustand und die Entwicklung der verschiedenen terrestrischen und aquatischen Ökosysteme liefern. Die **Mission wird von der DLR-Raumfahrtagentur mit Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz finanziert** und von einem **umfangreichen wissenschaftlichen Vorbereitungsprogramm und einer Bildungsinitiative begleitet**. Als Teil der wissenschaftlichen Missionsvorbereitung hat das EnMAP-Wissenschaftsteam im letzten Jahrzehnt eine Open-Source-Software (EnMAP-Box) entwickelt und eine Reihe von Expert:innen ausgebildet. Dieser MOOC ist die nächste Stufe, in der wir **unser Wissen mit allen potenziellen Nutzer:innen von Hyperspektraldaten teilen** und das **Wachstum einer globalen Gemeinschaft für abbildende Spektroskopie fördern** wollen. Lernt EnMAP sowie verschiedene andere Quellen von Hyperspektraldaten in den folgenden Lektionen kennen!

Eine detaillierte Beschreibung der EnMAP-Mission, ihrer Instrument- und Orbit-Eigenschaften sowie der verschiedenen Anwendungsbereiche befindet sich auf der [Missions-Website](#) und im EnMAP Science Plan sowie in der Broschüre und dem Flyer, die auf der Missions-Website zum Download zur Verfügung stehen. Wir werden in Lektion 4 mehr über die EnMAP-Mission lernen und in Lektion 5 später in diesem Kurs erfahren, wie man Zugang zu EnMAP-Daten erhält.

VIDEO: Basic-05: Sensor technologies & data acquisition techniques: the EnMAP Mission (*Sensortechnologien und Datenaufnahme: Die EnMAP Mission*)



URL of the video: <https://www.youtube.com/watch?v=LQZNtLp3RfM>

2 Einstiegstest: Bereit für die hyperspektrale Fernerkundung?

Bist du bereit für die hyperspektrale Fernerkundung? Wie bereits erwähnt, **solltest du über ein gewisses Grundverständnis der Prinzipien der optischen Fernerkundung verfügen**, um diesen Kurs wirklich genießen zu können. Wenn du das folgende Quiz bestehst, kannst du gerne mit dem Kurs fortfahren. Wenn du das Quiz bestanden hast, aber das Gefühl hast, dass du noch etwas mehr Wiederholung der Grundlagen der optischen Fernerkundung brauchst, mach dir keine Sorgen - die Themen von Lektion 3 decken alle notwendigen Grundlagen ab, also schenke diesen Themen besondere Aufmerksamkeit! Wenn du die erforderliche Mindestpunktzahl (7 von 10 richtigen Antworten, 70 %) nicht erreichst, empfehlen wir dir, **die unten aufgeführten Ressourcen zu nutzen**. In jedem Fall hast du eine **unbegrenzte Anzahl von Versuchen, um das Quiz zu bestehen**. Los geht's und viel Glück!

Einstiegstest-Quiz

Sehen die Fragen für dich kompliziert aus? Dann probiere die folgenden Ressourcen aus, um dich auf das „**Vorab-Quiz**“ vorzubereiten und danach die Welt der hyperspektralen Fernerkundung erkunden zu können!

Materialien (auf Englisch):

1. Kurs '[Land in Focus – Basics of Remote Sensing](#)' von EO-College
2. Webinar '[ARSET – Fundamentals of Remote Sensing](#)' von der NASA

Einstiegstest-Quiz

Ein Fernerkundungssystem, das die Sonne als Quelle für elektromagnetische Energie nutzt, wird als ... bezeichnet (Einfachauswahl)

- ... aktiv
- ... passiv
- ... neutral
- ... global

Welche Teile des elektromagnetischen Spektrums können wir sehen?
(Einfachauswahl)

- Ultraviolettes Licht
- Sichtbares Licht
- Infrarotlicht
- Mikrowellen

Ein Objekt erscheint dem Beobachtenden rot ... (Einfachauswahl)

- ... wenn es nur rote Wellenlängen absorbiert
- ... wenn es nur rote Wellenlängen durchlässt (transmittiert)
- ... wenn es alle sichtbaren Wellenlängen gleichermaßen reflektiert
- ... wenn es hauptsächlich rote Wellenlängen reflektiert

Der Spektralbereich, in dem elektromagnetische Strahlung die Atmosphäre ohne große Abschwächung passiert, wird als ... bezeichnet (Einfachauswahl)

- ... Ozonloch
- ... atmosphärisches Fenster
- ... schwarzes Loch
- ... Himmelsfenster

Der Punkt, der sich genau senkrecht unter der Position des Beobachtenden befindet, heißt ... (Einfachauswahl)

- ... Zenit
- ... Pol
- ... Nadir
- ... Himmelspunkt

In welchen Bereichen des elektromagnetischen Spektrums reflektiert gesunde Vegetation stark? (Einfachauswahl)

- Grün und Rot
- Blau und Grün
- Grün und Nahinfrarot
- Blau und Rot

Welche Begriffe können passiver Fernerkundung zugeordnet werden? (Mehrfachauswahl)

- Multispektral
- LiDAR
- Radar mit synthetischer Apertur (SAR)
- Hyperspektral

Welche der folgenden sind passive Fernerkundungs-Satellitenmissionen? (Mehrfachauswahl)

- Sentinel-2
- Landsat 8
- MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer)
- TerraSAR-X

Die grafische Darstellung der spektralen Antwort eines Objekts über die verschiedenen Wellenlängen des elektromagnetischen Spektrums wird als ... bezeichnet (Einfachauswahl)

- ... Liniendiagramm
- ... Spektrale Reflexionskurve
- ... Spektrales Merkmal
- ... Reflexionsbild

Richtig oder falsch? "Die räumliche Auflösung in der Fernerkundung beschreibt im Vergleich zu einem fotografischen Bild, wie viele Details sichtbar sind!" (Einfachauswahl)

- Richtig
- Falsch

3 Grundlagen der abbildenden Spektroskopie

In dieser Lektion wollen wir dich in die **Prinzipien der abbildenden Spektroskopie** einführen - Charly gibt dir im Video unten mehr Details zu den konkreten Lernzielen.

VIDEO: Basic-06: Principles of imaging spectroscopy: Lesson Intro (*Grundlagen der Abbildenden Spektroskopie: Lektion Intro*)



URL of the video:

<https://www.youtube.com/watch?v=jS7AZpUYZw>

3.1 Was ist abbildende Spektroskopie?

Der Begriff **Spektroskopie** bezieht sich auf physikalische Methoden, welche die Strahlung nach bestimmten Eigenschaften wie beispielsweise der Wellenlänge aufteilen. Die daraus resultierende Intensitätsverteilung wird als Spektrum bezeichnet. Mit Hilfe der Spektroskopie kann die Wechselwirkung zwischen elektromagnetischer Energie und Materie untersucht werden. Dabei wird insbesondere betrachtet, welche Wellenlängen des Lichts von einem Objekt reflektiert oder absorbiert werden, um so Materialien zu charakterisieren.

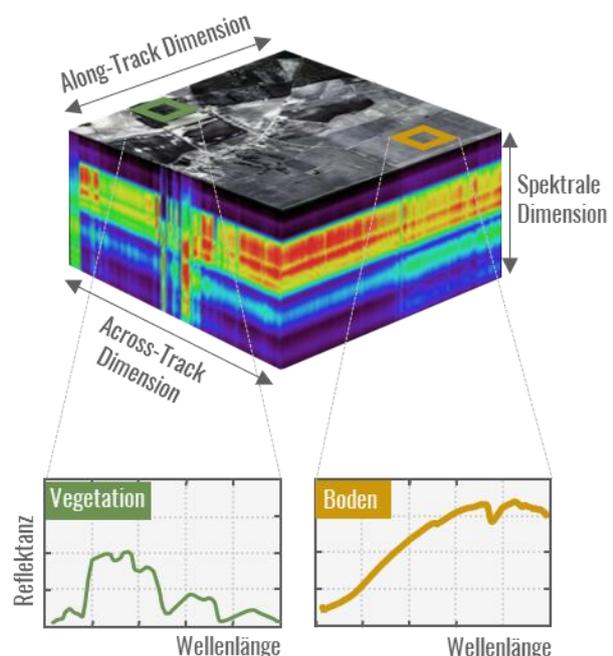


Abbildung 1 Hyperspektraler Bildwürfel mit zwei Beispielspektren
Brosinsky et al. (2022)

Abbildende Spektroskopie - oder hyperspektrale Fernerkundung, wie sie auch häufig genannt wird - bezieht sich auf abbildende Sensoren, die das Spektrum der von den Materialien der Erdoberfläche reflektierten Sonnenstrahlung in vielen zusammenhängenden Wellenbändern messen, sowohl vom Boden aus als auch aus der Luft oder dem Weltraum. Das daraus resultierende Bild - oder den Datenwürfel - kann man sich wie ein Foto vorstellen; anstelle der üblichen drei RGB-Kanäle gibt es jedoch bis zu Hunderte von Bändern, die eine Identifizierung und oft auch eine Quantifizierung von Materialien auf Grund der Form der Spektralkurve ermöglichen.



Infobox –Wusstest du das?

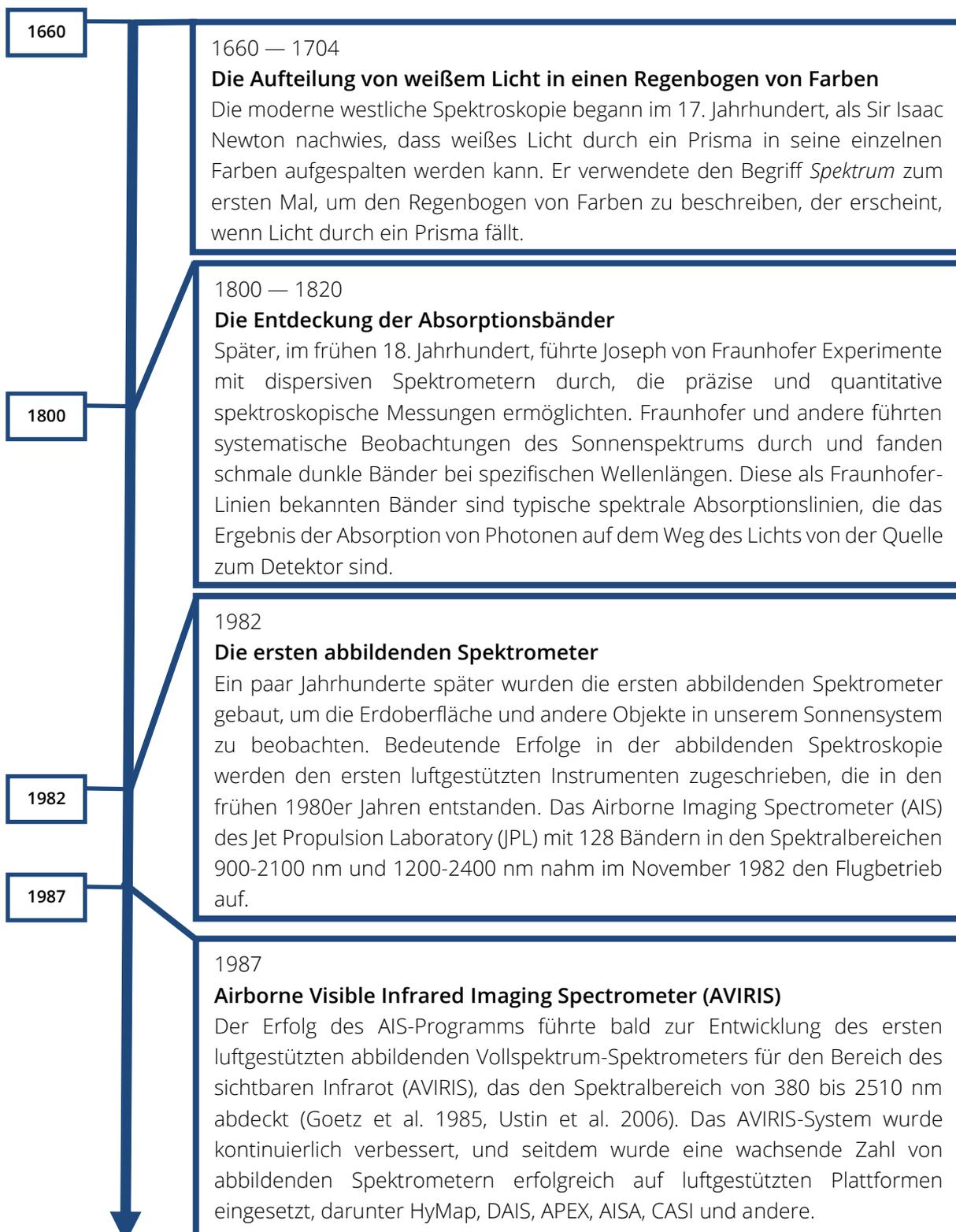
Der Begriff **hyperspektrale Fernerkundung** wird manchmal synonym mit abbildender Spektroskopie verwendet. Im englischen Sprachraum hat sich aufgrund der intensiven Nutzung in militärischen Bereichen in der zivilen Welt eine leichte Präferenz für die Verwendung des Begriffs „abbildende Spektroskopie“ gebildet.

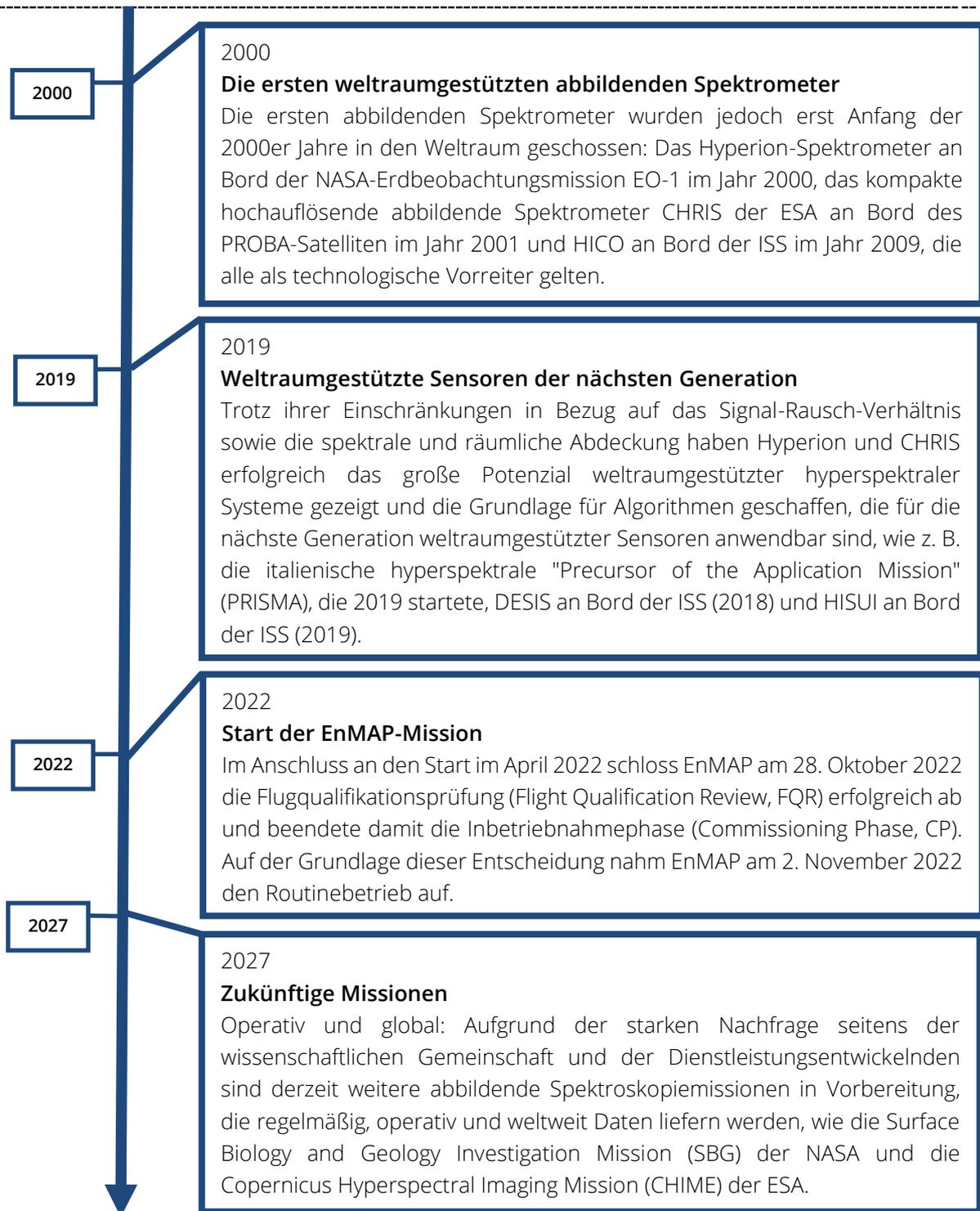
Der Begriff **hyperspektrale Fernerkundung** geht auf die Entwicklung des Airborne Imaging Spectrometer (AIS) und AVIRIS der NASA Mitte der 1980er Jahre zurück. Obwohl die NASA den früheren Begriff **abbildende Spektroskopie** dem Begriff **hyperspektrale Fernerkundung** vorzieht, hat sich der letztere Begriff im wissenschaftlichen und nicht-wissenschaftlichen Sprachgebrauch durchgesetzt. In einem von Sachverständigen geprüften Schreiben empfehlen Expert:innen, die Begriffe **abbildende Spektroskopie** oder **spektrale Bildgebung** zu verwenden und übertriebene Vorsilben wie "hyper-", "super-" und "ultra-" zu vermeiden, um irreführende Bezeichnungen in der Diskussion zu vermeiden.

Quelle: [Wikipedia](#)

3.2 Wichtige Meilensteine

In der folgenden **Grafik** kannst du die **wichtigsten Meilensteine der abbildenden Spektroskopie erkunden**. Bitte beachte, dass wir uns auf nicht-kommerzielle Missionen mit freier Datenpolitik in dem Bereich der weltraumgestützten Missionen fokussieren.





Weitere Einzelheiten zur Geschichte, zu den Meilensteinen und den Missionen siehe *Schaepman et al. 2009*, *Rast and Painter 2019*, *Taramelli et al. 2020* und andere Referenzpublikationen.

Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Wichtige Meilensteine

Welche der folgenden Sensoren sind weltraumgestützte Instrumente?

(Mehrfachauswahl)

- AIS
- PRISMA
- CHIME
- EnMAP
- AVIRIS
- Hyperion
- HICO

Welche der folgenden Sensoren sind luftgestützte Instrumente?

(Mehrfachauswahl)

- PRISMA
- AVIRIS
- HICO
- HYPERION
- AIS
- CHIME
- EnMAP

Wann wurde das erste weltraumgestützte Hyperspektralinstrument gestartet?

(Einfachauswahl)

- 1982
- 1995
- 2000
- 2022 mit dem Start von EnMAP, dem ersten Hyperspektralsensor im Weltraum.

3.3 Elektromagnetische Strahlung

Der Inhalt dieses Themas basiert teilweise auf dem Kurs '[Land in Focus – Basics of Remote Sensing](https://eo-college.org/courses/landinfocus/)' (in den grauen Boxen hervorgehoben).

URL: <https://eo-college.org/courses/landinfocus/>

Der Treibstoff der Fernerkundung

Die Anwendung von Fernerkundungssensoren und -methoden beruht auf dem Vorhandensein von elektromagnetischer (EM) Strahlung. Unabhängig davon, ob sie durch natürliche Emissionen entsteht (Sonne, Erde) oder aktiv vom Sensor ausgestrahlt wird, ohne diese Energiequellen kann kein Signal analysiert werden. Aber: Was genau sind "Wellen"? Man kann sich eine Welle als eine sich **bewegende Schwingung** vorstellen, die **Energie** transportiert.

Ein Beispiel für eine natürliche Wellenentwicklung sind Wasserwellen, die entstehen, wenn ein Stein ins Wasser geworfen wird. Eine andere Art von Wellen sind Schallwellen, die beim Sprechen entstehen oder wenn ein Polizeiauto vorbeifährt.

Die von der Sonne ausgehende Strahlung bewegt sich in Form von sogenannten **elektromagnetischen Wellen**. Dabei sind elektrische und magnetische Felder gekoppelt.

Ein Abstecher in die Geschichte: EM - Wellen

In den 1860er und 1870er Jahren entwickelte der schottische Wissenschaftler **James Clerk Maxwell** eine wissenschaftliche **Theorie** zur Erklärung von **EM-Wellen**. Er stellte fest, dass sich elektrische und magnetische Felder zu elektromagnetischen Wellen verbinden können. Er fasste diese Beziehung zwischen Elektrizität und Magnetismus in den so genannten „**Maxwell-Gleichungen**“ zusammen.

Heinrich Hertz, ein deutscher Physiker, wandte die Theorien von Maxwell auf die **Erzeugung und den Empfang von Radiowellen** an. Die Einheit der Frequenz einer Radiowelle - ein Zyklus pro Sekunde - wird zu Ehren von Heinrich Hertz als **Hertz** bezeichnet.

Sein Experiment mit Radiowellen löste zwei Probleme. Erstens wies er konkret nach, was Maxwell nur theoretisiert hatte - dass die **Geschwindigkeit von Radiowellen gleich der Lichtgeschwindigkeit** ist. Damit war bewiesen, dass Radiowellen eine Form des Lichts sind. Zweitens fand Hertz heraus, wie sich **elektrische und magnetische Felder von den Drähten lösen** und als Maxwell'sche Wellen - elektromagnetische Wellen - frei bewegen können.

Struktureller Blick auf eine EM-Welle

Wie unten dargestellt, besteht eine EM-Welle aus einem elektrischen Feld (EF, rot) und einem magnetischen Feld (MF, blau). Das EF variiert in seiner Größe in der Richtung, die senkrecht zur Bewegungsrichtung steht. Ein entsprechendes MF ist rechtwinklig zum EF ausgerichtet. Beide Felder bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit (~300.000 km/s).

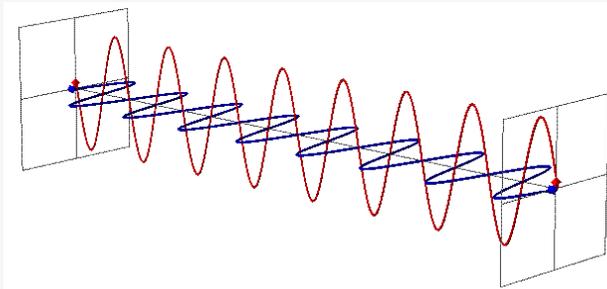


Abbildung 2 Eine fortlaufende EM-Welle mit einem elektrischen Feld (rot) und einem magnetischen Feld (blau). AWF-Wiki 2013

Wie beschreibt man eine EM-Welle?

Die Begriffe Licht, elektromagnetische Wellen und Strahlung beziehen sich alle auf das gleiche physikalische Phänomen: **elektromagnetische Energie**. Diese Energie kann durch die **Frequenz (f)**, die **Wellenlänge (λ)** und die **Lichtgeschwindigkeit (c)** beschrieben werden. Alle drei stehen in einem mathematischen Zusammenhang, so dass man, wenn man einen der Begriffe kennt, die beiden anderen mithilfe der folgenden Gleichung berechnen kann:

$$c = \lambda f$$

Daher können EM-Wellen durch die Eigenschaften zweier Parameter beschrieben werden: **a) Wellenlänge** und **b) Frequenz**. Beide sind eng miteinander korreliert (invers) und hängen voneinander ab.

Wie beschreibt man eine EM-Welle?

Wellenlänge

Elektromagnetische Wellen haben Wellenberge und -täler, ähnlich wie Meereswellen. Der Abstand zwischen den Wellenbergen wird als "Wellenlänge" bezeichnet und mit dem Symbol λ angegeben. Die kürzesten Wellenlängen sind nur Bruchteile der Größe eines Atoms, während die längsten Wellenlängen, die Wissenschaftler:innen derzeit untersuchen, länger sein können als der Durchmesser unseres Planeten.

Frequenz

Die Anzahl der Wellenberge, die einen bestimmten Punkt innerhalb einer Sekunde passieren, wird als Frequenz der Welle definiert. Eine Welle oder ein Zyklus pro Sekunde wird als ein Hertz (Hz) bezeichnet, nach Heinrich Hertz, der die Existenz von Radiowellen nachwies. Eine Welle mit zwei Zyklen, die einen Punkt in einer Sekunde passiert, hat eine Frequenz von 2 Hz.

Die Amplitude ist eine weitere wichtige Kenngröße, die den Abstand zwischen dem Höhepunkt und dem Tiefpunkt einer Welle angibt. Mit den drei Größen (Wellenlänge, Amplitude, Frequenz) bist du nun in der Lage, eine EM-Welle zu beschreiben.

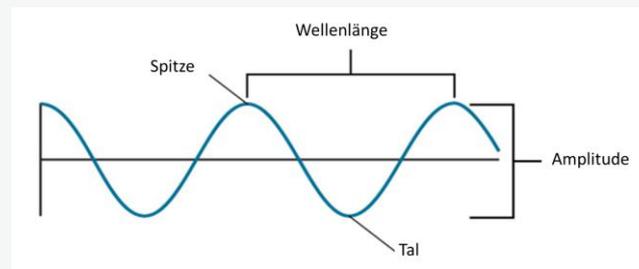


Abbildung 3 Zusammenhang zwischen Wellenlänge und Amplitude (Lumen Learning).



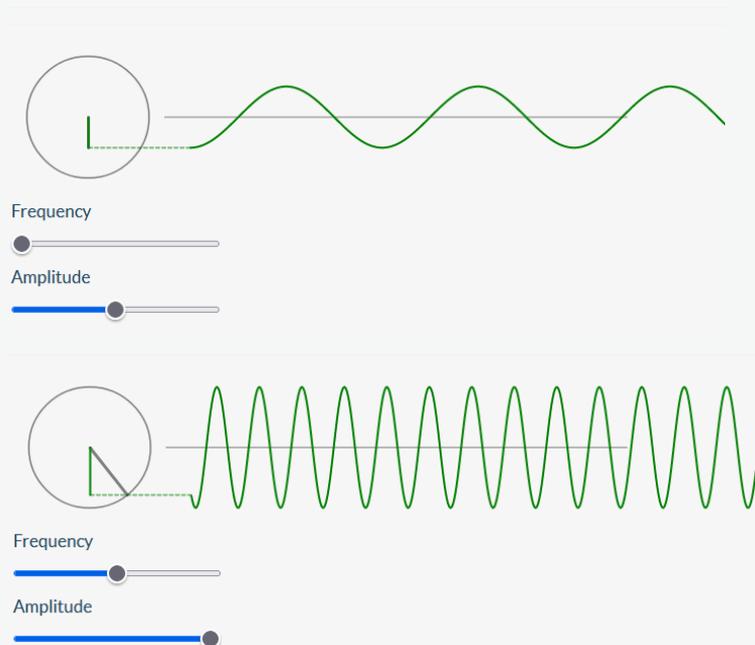
Interaktive Diagramme und Werkzeuge

Um zu den interaktiven Grafiken weitergeleitet zu werden, musst du unter [EO-College](#) eingeschrieben und eingeloggt sein. Die entsprechenden Abbildungen sind jedoch in dieser Offline-Version enthalten. Für ein optimales Lernerlebnis empfehlen wir dir, die Grafiken online anzuschauen.



Entdecke die einzigartigen Eigenschaften einer EM- Welle

Das unter **diesem [HYPERLINK](#)** verfügbare **interaktive Tool** ermöglicht dir eine praktische Erfahrung mit der **Frequenz und der Amplitude einer Welle**, zwei sehr wichtigen Parametern. Probiere die Schieberegler unten aus, um ein Gefühl dafür zu bekommen, was diese Parameter tatsächlich bedeuten.



Interaktive Abbildung 1 Zusammenhang zwischen Frequenz und Amplitude

Das Spektrum der EM-Strahlung

Elektromagnetische Energie **breitet sich in Wellen aus** und umfasst ein breites Spektrum von z.B. sehr kurzwelligen UV-Strahlen bis zu den sehr langen Mikrowellen. In der Fernerkundung wird diese Energie üblicherweise durch ihre Wellenlänge beschrieben, meist angegeben in Mikrometern [μm] oder Nanometern [nm]. Das **menschliche Auge** kann nur einen kleinen Teil dieses Wellenlängenspektrums, das **sichtbare Licht (englisch: Visible light, VIS)**, wahrnehmen. Wie du in der Grafik unten sehen kannst, nutzen optische Sensoren meist den Spektralbereich zwischen ca. 350 und 2500 nm. Der Bereich des für den Menschen sichtbaren Lichts (VIS) reicht von 380 bis 780 nm und umfasst die Farben Violett, Blau, Grün, Gelb, Orange und Rot. Auf das sichtbare Licht folgen die **infraroten Wellenlängen (IR)**, die in **nahes Infrarot (NIR, 700 - 1300 nm*)**, **kurzwelliges Infrarot (englisch shortwave infrared, SWIR, 1300 - 3000 nm*)**, **mittleres Infrarot (MIR)** und **thermales Infrarot (TIR)** unterteilt sind, gefolgt von langwelligen Wellenlängen wie **Mikrowellen** und **Radiowellen**.

**Diese Definition von Wellenlängenbereichen wird üblicherweise in der (optischen) Fernerkundung verwendet. Es gibt andere Definitionen, z. B. in der Spektroskopie (aus Clark 1999: Ultraviolett (UV): 1 bis 400 nm, sichtbar (VIS): 400 bis 700 nm, und Nahinfrarot (NIR): 700 bis 3000 nm).*

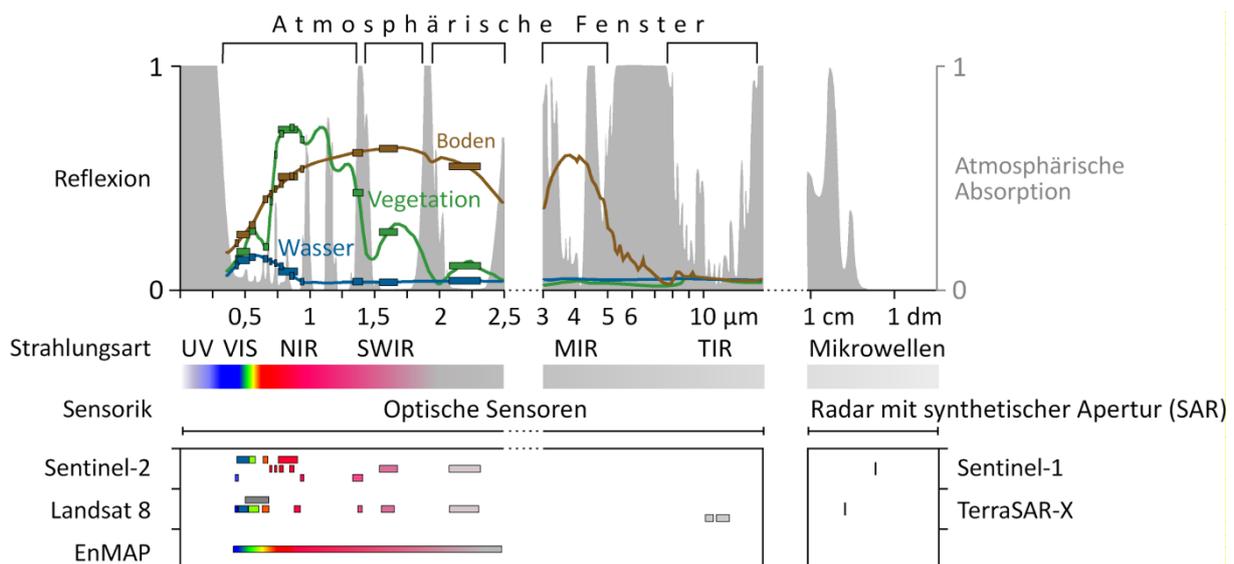


Abbildung 4 Das obige Diagramm zeigt verschiedene Bereiche des elektromagnetischen Spektrums (Mitte), Reflexionsspektren und atmosphärische Absorption (oben) und eine Auswahl von Sensoren, die für die dargestellten Strahlungsarten empfindlich sind (unten).

Mit freundlicher Erlaubnis von Theres Kuester

Die Strahlung wird von der Atmosphäre auf viele verschiedene Arten beeinflusst, die von der Wellenlänge abhängen: Die Sonne strahlt mit der höchsten Intensität im sichtbaren Bereich, während gleichzeitig die atmosphärische Durchlässigkeit am höchsten ist. Bei größeren Wellenlängen ist die Durchlässigkeit auf enge Bereiche reduziert. Dazu gehören die durchlässigen Bereiche im thermalen Infrarot, durch die die Erde Strahlung in den Weltraum abgibt. Auch im Mikrowellenbereich ist die Atmosphäre fast vollständig durchlässig. Da hier die Strahlung von Sonne und Erde gering ist, kann dieser Bereich von aktiven Radarsystemen genutzt werden. Kürzere Wellenlängen wie das UV werden von der Atmosphäre fast vollständig absorbiert und sind daher für die Fernerkundung, die sich auf die durchlässigen Bereiche (**atmosphärische Fenster**) konzentriert, vernachlässigbar.

Grundlegende Strahlungsgesetze

Es gibt vier **grundlegende Strahlungsgesetze**, von denen du gehört haben solltest, wenn du mit optischen Fernerkundungsdaten arbeitest. Diese Gesetze sind wichtig, um zu verstehen, wie die von einem Objekt ausgehende Strahlung von dessen Temperatur und Materialeigenschaften abhängt.

Stefan-Boltzmann-Gesetz

Die Abhängigkeit der emittierten Strahlung von der Temperatur folgt dem **Stefan-Boltzmann-Gesetz**. Grundsätzlich strahlt jeder Körper, dessen Temperatur über dem Nullpunkt (-273 °C oder 0 K) liegt, Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung ab. Die abgegebene Strahlung ist proportional zur absoluten Temperatur des Körpers hoch vier. Ideale Emitter (Absorber) werden als schwarze Körper bezeichnet.

$$M = \sigma * T^4$$

Wobei:

- M = Strahlung (W/m^2)
- σ = Stephan-Boltzmann-Konstante ($5.67051 * 10^{-8} W/m^2K$)
- T = absolute Temperatur (K)

Wiensches Verschiebungsgesetz

Das Emissionsmaximum der Temperaturstrahlung wird durch das **Wiensche Verschiebungsgesetz** erklärt, das besagt, dass höhere Temperaturen mit einem Intensitätsmaximum bei kürzeren Wellenlängen und niedrigere Temperaturen mit einem Intensitätsmaximum bei höheren Wellenlängen einhergehen. Die Sonne mit ihren hohen Oberflächentemperaturen von etwa 6000 K emittiert beispielsweise Licht mit einer maximalen Intensität von etwa 0.5 μm (sichtbarer Bereich), während die Erde mit einer durchschnittlichen Oberflächentemperatur von 300 K vorwiegend Licht im mittleren Infrarotbereich mit einem Maximum um 10 μm (auch thermales Infrarot genannt) emittiert.

$$\lambda_{\max} = \frac{T}{A}$$

Wobei:

- λ_{\max} = Wellenlänge der maximalen Intensität (μm)
- A = Wiensche Verschiebungskonstante ($2898 \mu\text{m} \cdot \text{K}$)
- T = Temperatur (K)

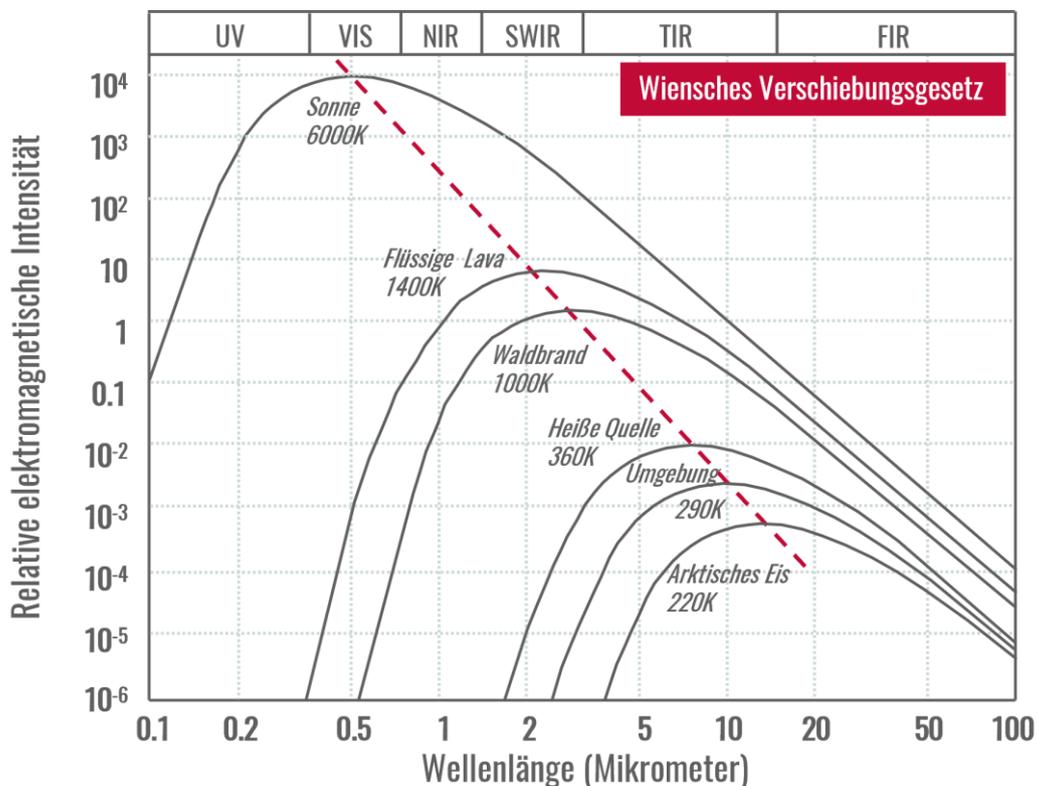


Abbildung 5 Die obige Grafik zeigt das Emissionsmaximum der Temperaturstrahlung.
Angepasst von Jensen (2007) und Lillesand et al. 2008

Plancksches Strahlungsgesetz

Die typische Strahlungsquelle in der abbildenden Spektroskopie ist die Sonne. Sie entspricht einem nahezu idealen Strahler, auch Schwarzkörper genannt. Die Strahlung der Sonne hängt, wie bei jedem idealen Strahler, ausschließlich von ihrer Temperatur ab (Materialeigenschaften sind irrelevant) und kann mit dem **Planckschen Strahlungsgesetz** als Funktion der Wellenlänge beschrieben werden.

$$B_{(\lambda,T)} = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

Wobei:

- B_λ = Spektrale Strahldichte
- k = Stephan-Boltzmann-Konstante ($1.38064852 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$)
- h = Plancksche Konstante ($6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$)
- T = Absolute Temperatur (K)
- c = Lichtgeschwindigkeit

Kirchhoffsches Gesetz

Letztendlich wird die gegenseitige Abhängigkeit von Emissions- und Absorptionsvermögen der Strahlung durch das **Kirchhoffsche Gesetz** (das die Beziehung zwischen einem schwarzen Strahler und einem echten Strahler herstellt - im Gleichgewicht muss die emittierte Strahlung gleich der absorbierten Strahlung sein) beschrieben.

$$1 - \epsilon = R$$

Wobei:

- ϵ = Emissionsgrad
- R = Reflexionsgrad

Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Elektromagnetische Strahlung (EMR)

Elektromagnetische Strahlung wird durch die Wellenlänge und Frequenz beschrieben. Sie sind umgekehrt proportional, d.h. (Einfachauswahl)

- ... je kürzer die Wellenlänge, desto höher die Frequenz
- ... je höher die Frequenz, desto länger die Wellenlänge
- ... sie werden in denselben Einheiten angegeben

Fülle die Lücken (Optionen: VIS, NIR):

Das menschliche Auge ist empfindlich für den Wellenlängenbereich, den wir nennen. Er befindet sich zwischen dem UV und den Bereichen des elektromagnetischen Spektrums.

Welche der folgenden Aussagen sind richtig: (Mehrfachauswahl)

- Alle Objekte > 0 K emittieren Strahlungsenergie
- Heißere Objekte strahlen mehr Gesamtenergie pro Flächeneinheit ab als kältere Objekte
- Je heißer der strahlende Körper ist, desto kürzer ist die Wellenlänge des Strahlungsmaximums
- Perfekte Absorber (perfekte Strahler) werden als Schwarzkörper bezeichnet

3.4 Interaktion von EMR mit der Atmosphäre

In diesem Thema lernst du etwas über die Wechselwirkungen zwischen der Strahlung und der Erdatmosphäre. Diese Schicht, die unseren Planeten umgibt, hat einen enormen Einfluss auf das Signal, das wir messen. Die Atmosphäre ist kein Vakuum und daher wird die Strahlung auf verschiedene Weise verändert: Extraterrestrische Strahlung, die die Erde erreicht, tritt zunächst in die oberen Schichten der Atmosphäre ein, wo ein Teil der Strahlung in den Weltraum zurück **reflektiert** wird. Der andere Teil durchquert die Atmosphäre und unterliegt weiteren wellenlängenabhängigen Prozessen, z. B. wird die Strahlung von gasförmigen und partikelförmigen Bestandteilen **absorbiert** und **gestreut** (ein Prozess, der Extinktion genannt wird). Schauen wir uns die Prozesse ein wenig genauer an ...

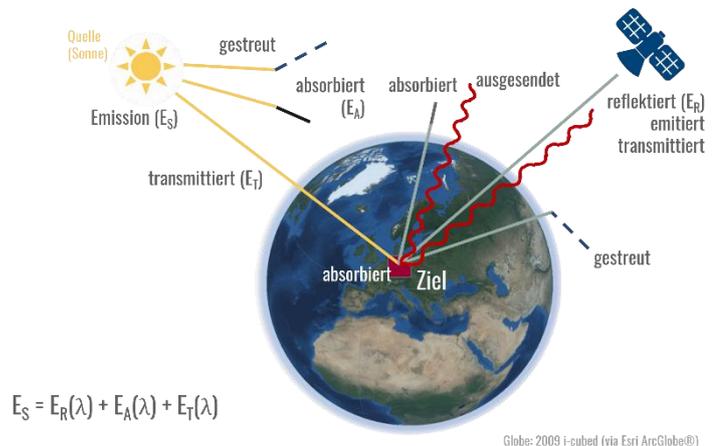


Abbildung 6 Allgemeine Wechselwirkung des Sonnenlichts mit der Erdoberfläche.

Brosinsky et al. (2019). Globe: 2009 i-cubed (via Esri ArcGlobe®)

Absorption

Die Absorption elektromagnetischer Strahlung **ist der Weg, auf dem die Energie eines Photons von der Materie aufgenommen wird.** Dadurch wird die elektromagnetische Energie in andere Energieformen umgewandelt, beispielsweise in Wärme. In bestimmten Wellenlängenbereichen absorbieren die Stoffe in der Atmosphäre so stark, dass nur sehr wenig oder gar keine Strahlung die Erdoberfläche erreicht. Diese Wellenlängenbereiche werden als atmosphärische **Absorptionsbänder** bezeichnet und werden hauptsächlich durch Wasserdampf, Kohlendioxid und Ozon verursacht. In der Fernerkundung sind wir auf (relativ) durchlässige Wellenlängenbereiche angewiesen, welche als **atmosphärische Fenster** bezeichnet werden. So ist beispielsweise der sichtbare Bereich für

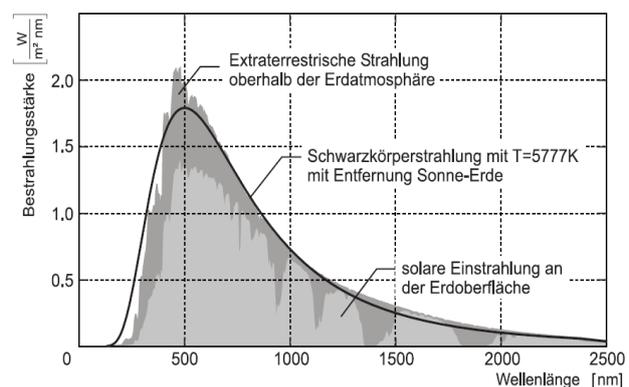


Abbildung 7 Atmosphärische Absorption.
Angepasst von Küster 2011

elektromagnetische Strahlung relativ durchlässig. Im Gegensatz zur Streuung ist die **Absorption ein effektiver Energieverlust für die Strahlung.**

Streuung

Atmosphärische Streuung beschreibt die Streuung von Strahlung in der Atmosphäre durch Partikel. Sie bezieht sich auf eine Richtungsänderung der elektromagnetischen Strahlung, die nicht vorhersehbar ist (im Gegensatz zur Reflexion). Die Streuung **ist eine Funktion (1) der Wellenlänge der einfallenden Strahlung und (2) der Größe der streuenden Teilchen:**

Unter **Rayleigh-Streuung (Streupartikel < Wellenlänge)** versteht man die diffuse Streuung elektromagnetischer Wellen an winzigen Partikeln oder Molekülen (wie Stickstoff oder Sauerstoff), deren Durchmesser viel kleiner ist als die Wellenlänge. Da die Streuung umso stärker ist, je kürzer die Wellenlänge ist (die kürzesten Wellenlängen sind blau), ist die Rayleigh-Streuung dafür verantwortlich, dass der Himmel blau erscheint.

Die Mie-Streuung (Streupartikel ~ Wellenlänge) wird durch Partikel in der Atmosphäre verursacht, deren Durchmesser größer ist als die Wellenlänge der einfallenden Strahlung, wodurch längere Wellenlängen betroffen sind. Partikel, die Mie-Absorption verursachen, werden als Aerosole bezeichnet und umfassen beispielsweise Meersalz, Staub, biologische Stoffe, Sulfate, Nitrate usw., die durch Verdunstung, industrielle Verschmutzung, (Wald-)Brände und Vulkanausbrüche entstehen.

Nicht-selektive Streuung (Streupartikel > Wellenlänge) wird durch Wasserdampf- oder Eispartikel verursacht, die > 10-mal so groß sind wie die Wellenlänge der einfallenden Strahlung. Alle Wellenlängen werden gleich gut gestreut. Diese Streuung tritt am dichtesten an der Erdoberfläche auf.

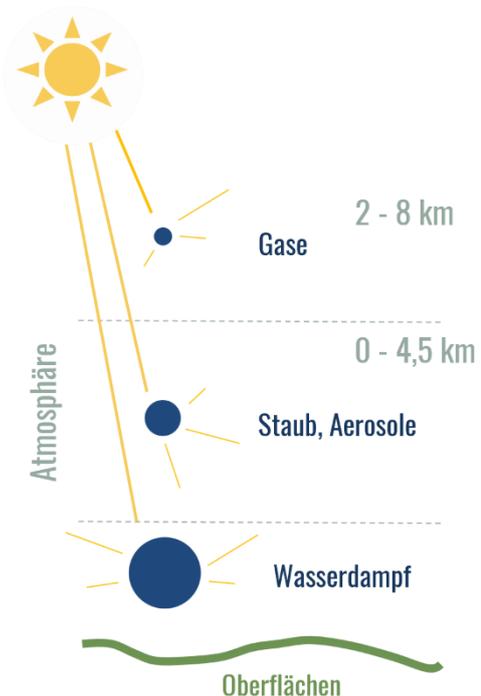


Abbildung 8 Atmosphärische Streuung.
Angepasst von Jensen 2007

Reflexionsgrad

Der **Reflexionsgrad** bezieht sich – Überraschung – auf elektromagnetische Strahlung, die von einer Oberfläche reflektiert wird oder im Falle der Atmosphäre von Aerosolen oder Wolken. Ein großer Teil der einfallenden Strahlung im sichtbaren und kurzwelligen Infrarotbereich wird direkt von letzteren reflektiert. Dies ist eindeutig ein Nachteil der optischen Fernerkundung, da wir auf einen **wolkenfreien Himmel angewiesen** sind.



Abbildung 9 Atmosphärischer Reflexionsgrad – abbildende Spektroskopie ist auf einen wolkenfreien Himmel angewiesen!

Großbritannien und Irland aufgenommen von MERIS am 7. Februar 2009. ESA

Strahlungstransfer (und einige Fachbegriffe)

In der optischen Fernerkundung ist die **dominierende Energiequelle die direkte Sonneneinstrahlung** (siehe „1“ in Abbildung 10) (etwa 90 %). Hinzu kommt die **diffuse Himmelsstrahlung (2,3)**, die durch Streuung und Absorption in der Atmosphäre entsteht. Dabei wird der Teil der diffusen Himmelsstrahlung, der in Richtung des Sensors wirkt, ohne jemals die Oberfläche zu erreichen, als **„Luftlicht“ (eng. path radiance) (2)** bezeichnet. Diese wird durch die Streuprozesse innerhalb der Atmosphäre bestimmt und ist stark wellenlängenabhängig.

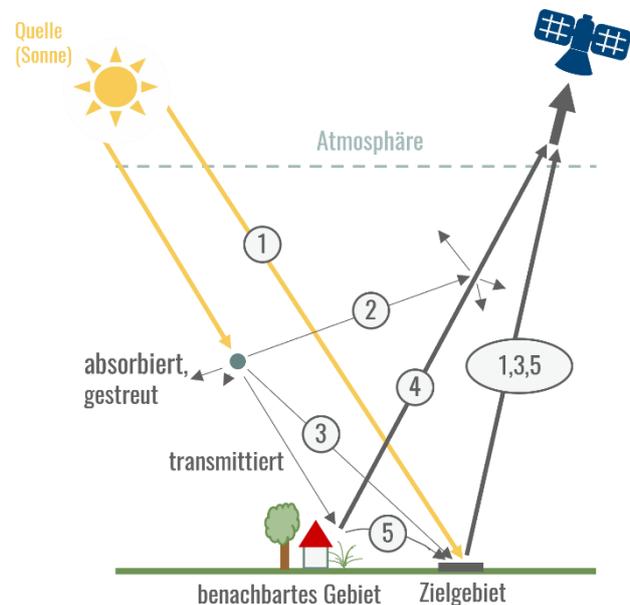


Abbildung 10 Strahlungstransfer.
Angepasst von Jensen 2007

Auf dem Weg zum Sensor muss die gesamte vom Objekt reflektierte Strahlung (1,3,5) ERNEUT die Atmosphäre durchqueren und wird dabei abgeschwächt (2,4). Im Idealfall ist das vom Sensor aufgezeichnete Signal also eine echte Funktion der Strahlungsstärke, die das Ziel innerhalb des momentanen Sichtfeldes in einem

bestimmten Raumwinkel verlässt. In der Realität können jedoch auch andere Strahlungsenergien über verschiedene andere Wege in das Sichtfeld des Sensors eindringen und störendes Rauschen verursachen (Jensen 2007).

Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Interaktion von EMR mit der Atmosphäre

Fülle die Lücken (Optionen: absorbiert, reflektiert):

Die elektromagnetische Strahlung, die die Erde erreicht, tritt zunächst in die obere Schicht der Atmosphäre ein, von wo aus wieder ein Teil der Strahlung wieder in den Weltraum wird. Der andere Teil durchquert die Atmosphäre und wird und von Gasen, Molekülen, Partikeln, gasförmige und/oder partikelförmigen Bestandteilen gestreut.

Die Streuung ist eine Funktion der Wellenlänge der einfallenden Strahlung und der Größe der streuenden Partikel. Sortiere die Art der Streuung nach der richtigen Partikelgröße (Optionen: Rayleigh-Streuung, Mie-Streuung, nicht-selektive Streuung):

Partikel, deren Durchmesser viel kleiner ist als die Wellenlänge: Wähle ein Element

Partikel, deren Durchmesser größer ist als die Wellenlänge: Wähle ein Element

Partikel, deren Durchmesser > 10 mal so groß ist wie die Wellenlänge: Wähle ein Element

Welche Art der Streuung ist für das blaue Erscheinen des Himmels verantwortlich? (Einfachauswahl)

- Rayleigh-Streuung
- Mie-Streuung
- Nicht-selektive Streuung

3.5 Interaktion von EMR mit der Erdoberfläche

Auf der Erdoberfläche tritt die Strahlung schließlich mit einem Objekt in Wechselwirkung. Im Prinzip unterscheidet sich diese Wechselwirkung nicht so sehr von den oben erläuterten atmosphärischen Prozessen, da die eintreffende Strahlung teilweise absorbiert, reflektiert und (bei durchsichtigen Objekten) durchgelassen (transmittiert) wird. Auch hier bedeutet Absorption die Aufnahme von Energie durch eine Substanz, und Reflexion bedeutet, dass einfallende Strahlung reflektiert wird, ohne dass Energie absorbiert oder abgegeben wird. Bei der Transmission durchdringt die Strahlung ein Objekt ohne Energieveränderung. Der reflektierte Teil der Strahlung verlässt das Objekt als gerichtete spektrale Strahlung, modifiziert durch die spektralen Eigenschaften (Reflexionsgrad) des Objekts - dies ist eigentlich der Teil, für den sich die meisten (abbildenden) Spektroskopie-Anwendungen interessieren. Neben den physikalisch-chemischen Eigenschaften hängt der Reflexionsgrad jeder Oberfläche von der **Beleuchtungs- und Betrachtungsgeometrie sowie von der Oberflächenrauigkeit** ab, wie Charly im folgenden Video erklärt.



In diesem Kurs wirst du mehrere **Videos sehen, die wir für dich interaktiv gestaltet haben**. Sie enthalten Fragen, die du versuchen kannst, zu beantworten. Die Antworten werden nicht benotet, du hast unzählige Versuche, du kannst sie überspringen und sogar im Video zurück- und vorspulen, um die richtige Antwort zu finden. **Probier's einfach aus!** Sie werden dir helfen, dich auf die bewerteten Quizfragen vorzubereiten und die wichtigsten Aspekte jedes Themas zu behalten (in englischer Sprache).

In diesem Dokument findest du die Fragen unter den Videos. Die Fragen können mit Hilfe der Videos beantwortet werden. Um die Antworten zu überprüfen, muss das Video online im MOOC auf <https://eo-college.org/courses/beyond-the-visible/> angesehen werden.

VIDEO: Basic-07: Principles of imaging spectroscopy: Illumination and surface roughness (*Grundlagen der abbildenden Spektroskopie: Beleuchtung und Oberflächenrauigkeit*)



URL of the video:

<https://www.youtube.com/watch?v=TjeDdcrcsas0&t=4s>

VIDEO: Grundlagen der abbildenden Spektroskopie: Beleuchtung und Oberflächenrauigkeit

Die Wahrnehmung der Oberflächenrauigkeit ist unabhängig von der Wellenlänge.

- Richtig
- Falsch

Ergänze die fehlenden Wörter

"Vorwärtsstreuung wird (mit/gegen) die Beleuchtungsrichtung und Rückstreuung (mit/gegen) die Beleuchtungsrichtung beobachtet. Daher ist die Reflexion im Bereich der Rückstreuung immer (schwächer/stärker) als im Bereich der Vorwärtsstreuung."

Jetzt kennst du wahrscheinlich die wichtigsten Prozesse, Aspekte und Umstände, die deine Spektralmessungen verfälschen können. Für die meisten Anwendungen müssen wir diese Effekte kennen, um sie korrigieren zu können. In der Regel sind wir jedoch an den physikalisch-chemischen Eigenschaften unserer Zielobjekte interessiert. Wie also beeinflussen die physikalisch-chemischen Eigenschaften von Materialien ihre Reflexionseigenschaften? Einige dieser Eigenschaften sind so dominant, dass man sie aus multispektralen Daten ableiten kann, z.B. die "Grünheit" der Vegetation. Hyperspektraldaten ermöglichen jedoch die Erfassung von viel mehr spektralen Details, und deshalb wird Charly im nächsten Video erklären, **wie physikalisch-chemische Eigenschaften zu Absorptionsbanden führen, die eine Materialidentifizierung und oft auch eine Quantifizierung ermöglichen:**

VIDEO: Basic-08: Principles of imaging spectroscopy: Electronic processes
(Grundlagen der abbildenden Spektroskopie: Elektronische Prozesse)



URL of the video:

<https://www.youtube.com/watch?v=oslWl19VF0E&t=3s>

VIDEO: Grundsätze der abbildenden Spektroskopie: Elektronische Prozesse

Der wichtigste Prozess für die optische Fernerkundung ist ...

- Reflexion
- Transmission
- Absorption

Ergänze die fehlenden Wörter

Erinnerst du dich? „Elektronentransferprozesse benötigen (sehr wenig/sehr viel) Energie. Die dadurch verursachten Bänder sind daher meist recht (breit/schmal) und liegen im kurzwelligen UV-Bereich“

VIDEO: Grundsätze der abbildenden Spektroskopie: Elektronische Prozesse

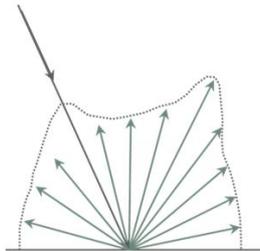
"Abgesehen von den geometrischen Beleuchtungs- und Beobachtungsbedingungen sowie der Oberflächenrauigkeit hängen die Reflexionseigenschaften eines Objekts ab von seinen ... "
(Mehrfachauswahl)

- Materialeigenschaften
- Chemischen Eigenschaften
- Physikalischen Eigenschaften

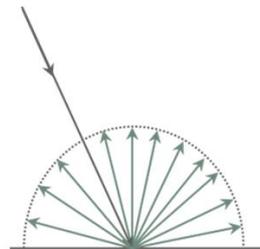
Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Interaktion von EMR mit dem Ziel

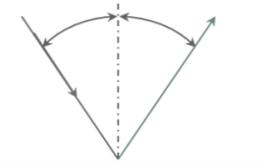
Die Reflexionseigenschaften eines Objekts hängen in erster Linie mit seinen Oberflächeneigenschaften zusammen. Ordne die Art der Reflexion dem richtigen Graphen zu (Optionen: diffus / Lambertsche, realer Fall / Mix, spiegelnd).



Wähle ein Element



Wähle ein Element



Wähle ein Element

Fülle die Lücken

Der wichtigste Prozess für die optische Fernerkundung ist die Absorption. Strahlungsenergie, die auf ein Objekt trifft, stimuliert den Elektronentransfer und

Wähle ein Element auf molekularer Ebene.

Welche geometrischen Faktoren beeinflussen die Oberflächenreflexion?
(Mehrfachauswahl)

- Farbe
- Blickwinkel
- Oberflächenrauigkeit
- Einfallswinkel

3.6 Spektrale Reflexion ausgewählter Oberflächenmaterialien

Geologie & Mineralien

Die Reflexionsspektren von Mineralien werden im sichtbaren Nahinfrarot-Wellenlängenbereich (400 bis 1300 nm) durch die An- oder Abwesenheit von Übergangsmetallionen (z. B. Fe, Cr, Co, Ni) dominiert, was zu Absorptionsmerkmalen führt, die auf elektronische Prozesse zurückzuführen sind. Die An- oder Abwesenheit von Wasser und Hydroxyl, Karbonat und Sulfat, die weit verbreitete Bestandteile der Erdoberfläche sind,

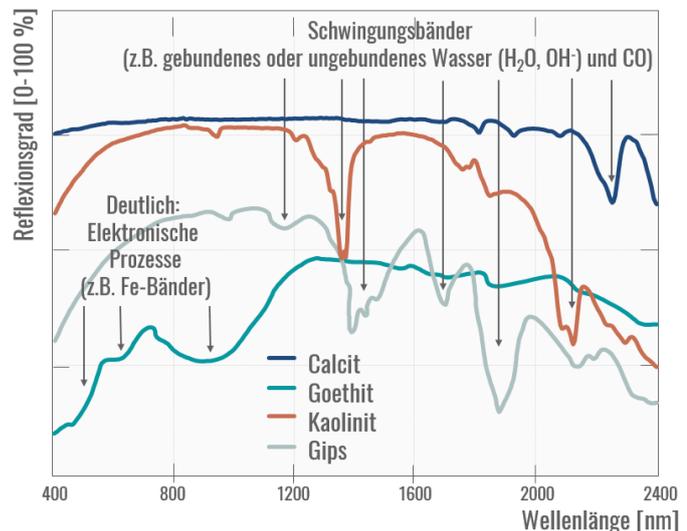


Abbildung 11 Reflexionsspektren verschiedener Minerale.
Mit freundlicher Erlaubnis von Hermann Kaufmann

bestimmen Absorptionsmerkmale im kurzwelligen Infrarot Bereich (SWIR, 2000 bis 2500 nm) aufgrund von Schwingungsprozessen. Im Allgemeinen ist die Tiefe der Absorptionsbänder mit der (relativen) Menge des vorhandenen Materials korreliert.

Denk immer daran, dass wir **nur die Oberfläche von Materialien sehen!** Oberflächenbeschichtungen, z. B. eine Eisenoxidpatina auf einem Mineral oder Flechten auf einem Felsen, verändern die Oberfläche und verdecken somit charakteristische Reflexionsmerkmale.

Böden

Da die Hauptbestandteile der Bodenminerale keine Absorptionsmerkmale im VNIR- und SWIR-Bereich aufweisen (Hunt, 1977), werden ihre **spektren Reflexionseigenschaften** hauptsächlich durch den **Gehalt an organischer Substanz, die Zusammensetzung der Tonminerale, den Eisenoxidgehalt, den Feuchtigkeitsgehalt, den Salzgehalt, die Textur und die Oberflächenrauigkeit beeinflusst**. Typischerweise haben Böden breite, flache Absorptionsmerkmale bei Wellenlängen zwischen 400 nm und 2500 nm, die mit Eisenoxid und organischem Material zusammenhängen. Im Allgemeinen nimmt der Reflexionsgrad mit zunehmendem Gehalt an organischer Substanz und/oder Feuchtigkeit ab. Eine Zunahme der Partikelgröße führt ebenfalls zu einer Abnahme der Gesamtreflexion. Selbst geringe Mengen an Eisenoxiden können die VNIR-Spektren erheblich verändern und breite Absorptionsmerkmale insbesondere um 400 nm, 700 nm und 870 nm verursachen (Ben-Dor et al. 1999). Im Gegensatz dazu zeigen verschiedene Tonminerale (z. B. Montmorillonit, Kaolinit, Illit, Smektit) und Karbonate ausgeprägte schmalbandige Absorptionsmerkmale im SWIR-Bereich zwischen 2000 nm und 2500 nm (Ustin et al., 2004). **Übrigens, für die Unterscheidung zwischen nacktem Boden und trockener Vegetation ist die hyperspektrale Information entscheidend** (Zelluloseabsorptionsbanden).

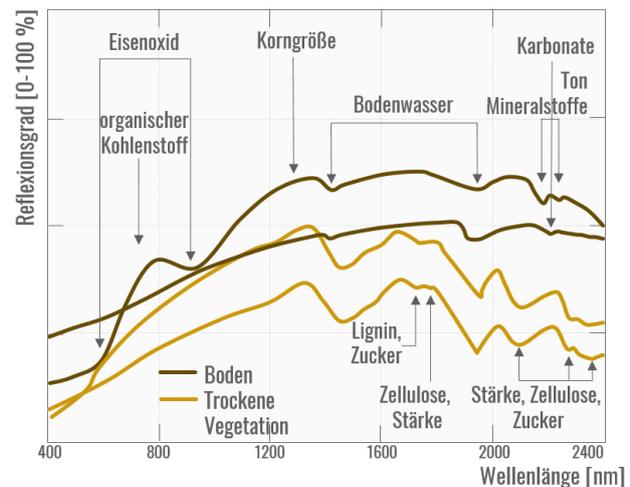


Abbildung 12 Reflexionsspektren von Boden und trockener Vegetation.

Spektren mit freundlicher Erlaubnis von Sabine Chabrilat

Grüne Vegetation

Die Absorptionsmerkmale von Vegetation sind überwiegend sehr ähnlich, sogar zwischen verschiedenen Pflanzenarten, weil die der Absorption zugrundeliegenden molekularen Mechanismen in verschiedenen Substanzen der Pflanzen zu finden sind (z. B. O-H-Bindung in Wasser, Zellulose und Stärke). Daher sind eindeutige Zuordnungen von Absorptionsbändern und molekularen Prozessen schwer zu treffen. Außer den Blattpigmenten (z.B. Chlorophyll und Carotinoide) kommen viele der biochemischen Pflanzenstoffe nur in geringen Konzentrationen vor, so dass nur

minimale Absorptionsbänder gemessen werden. Darüber hinaus gibt es **vielfältige Streuprozesse am Blatt (Mesophyll), an der Pflanze und in der Baumkrone**, die die Form der Absorptionsbänder bestimmen.

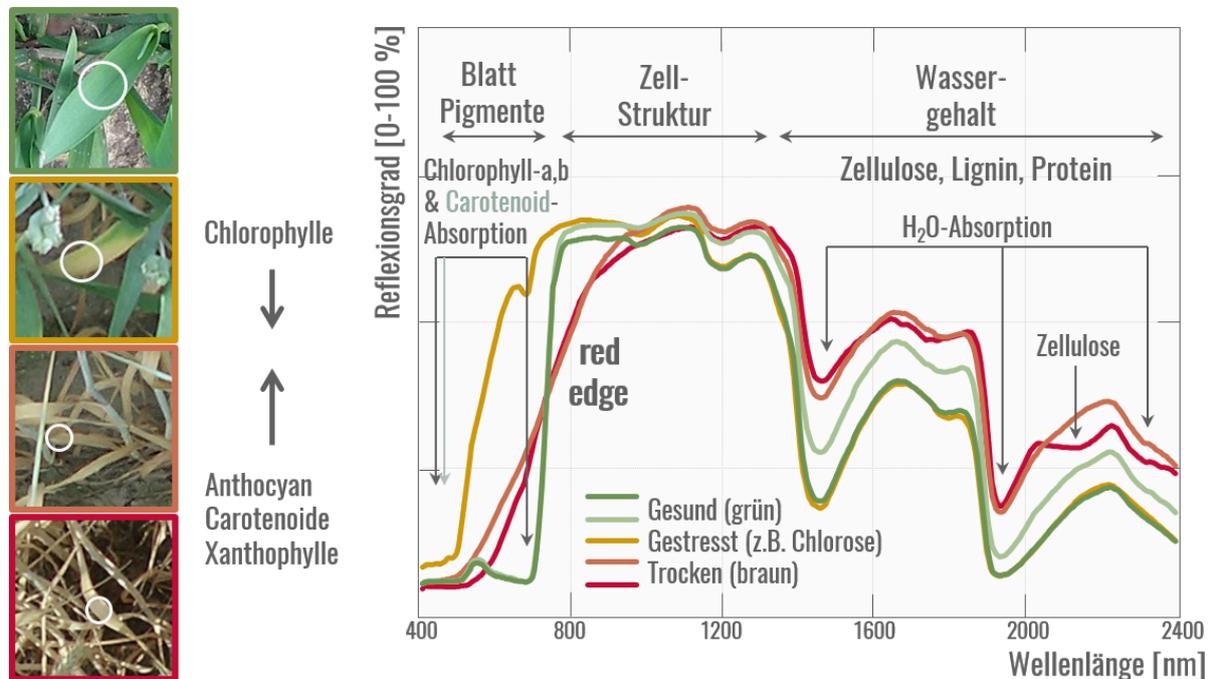


Abbildung 13 Reflexionsspektren von grüner, gestresster und trockener Vegetation.
Mit freundlicher Erlaubnis von Hermann Kaufmann

Im Allgemeinen hat die **spektrale Reflexionskurve gesunder grüner Vegetation ein lokales Maximum im sichtbaren (VIS)** Teil des elektromagnetischen Spektrums, bedingt durch die Blattpigmente: Chlorophyllpigmente absorbieren selektiv blaues (400-500 nm) und rotes (600-700 nm) Licht für die Photosynthese und weniger grünes Licht (500-600 nm), was zu einer "grünen Spitze (green peak)" und dem grünen Aussehen gesunder Vegetation für das menschliche Auge führt. Andere Pigmente wie Carotinoide und Xanthophylle haben eine starke Absorption im blauen Wellenlängenbereich (400-500 nm) und sind für die verschiedenen Blattfarben verantwortlich.

Die **spektrale Reflexionskurve steigt zum Nahinfrarotbereich (NIR) hin stark an**. Im NIR (700-1300 nm) ist die Blattabsorption durch Pigmente und andere Bestandteile gering und die meiste Energie wird je nach den strukturellen Merkmalen des Blattes reflektiert, was zu einem hohen Plateau führt.

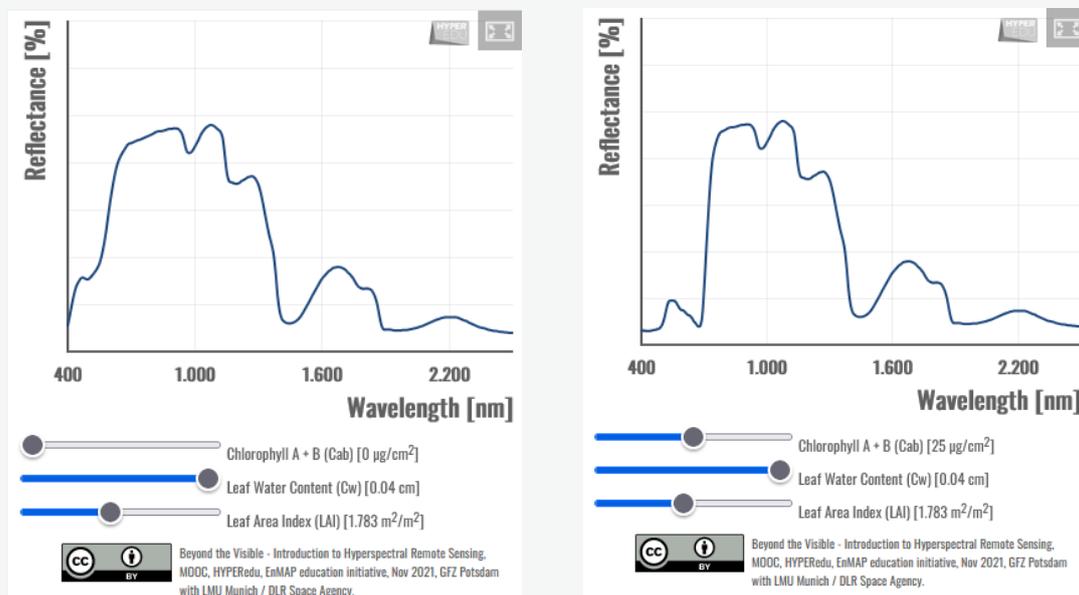
Der Bereich zwischen rotem (VIS) und nahinfrarotem Licht ist durch einen steilen Anstieg gekennzeichnet, der als **"red edge"** bezeichnet wird und bei der Erkennung von Pflanzenstress verwendet wird. Der Reflexionsgrad von gestresster Vegetation ist im Allgemeinen im VIS-Bereich höher und im Infrarotbereich niedriger als bei gesunder Vegetation. Außerdem kommt es im roten Randbereich des Spektrums zu

einer Abflachung sowie Verschiebung hin zu kürzeren Wellenlängen. Der SWIR-Bereich (1300-2500 nm) wird von der Wasserabsorption dominiert. Ein Anstieg des Feuchtigkeitsgehalts der Blätter führt zu einer allgemeinen Abnahme des Reflexionsgrads, insbesondere im NIR- und SWIR-Bereich, begleitet von einer Zunahme (Tiefe, Breite) der Wasserabsorptionsmerkmale bei 1400 und 1900 nm.



Erforsche die Spektren der Vegetation

Beim Verschieben des Schiebereglers erhöht oder verringert sich der Inhalt (Werte in Klammern) und das Spektrum passt sich entsprechend an. Diese Abbildung basiert auf dem für die EnMAP-Box entwickelten IVVRM-Tool. IVVRM ist die Abkürzung für "Interactive Visualization of Vegetation Reflectance Models". Im [entsprechenden Tutorial](#) oder unter diesem [LINK](#) kannst du die Parameter selbst manipulieren und viel mehr Details in den Veränderungen des Spektrums beobachten.



Interaktive Abbildung 2 Vegetationsspektrum, das sich interaktiv an veränderte Eigenschaften von Chlorophyll- und Blattwassergehalt (Leaf Water Content) und Blattflächenindex (Leaf Area Index) anpasst.

Binnen- und Küstengewässer

Die **Reflexionskurve von flüssigem Wasser ist durch eine geringe Reflexion** im sichtbaren Bereich und eine hohe (fast vollständige) Absorption im nahen Infrarot und darüber hinaus charakterisiert. Aufgrund dieser Absorptionseigenschaften lassen sich Gewässer und wasserhaltige Objekte auch mit multispektralen Daten leicht abgrenzen und identifizieren. Darüber hinaus wird die abbildende Spektroskopie zur Messung von optischen Bestandteilen wie Pigmenten (z. B. Chlorophyll), einer breiten Reihe von Phytoplanktonarten, gelösten organischen Stoffen und schwebenden Nicht-Algenpartikeln (z. B. Sedimente) eingesetzt. Küsten- und Binnengewässer sind optisch komplexer als offene Meeressgewässer, die hauptsächlich durch einen optischen Parameter, nämlich die Meeresfarbe (ocean color) charakterisiert werden können.

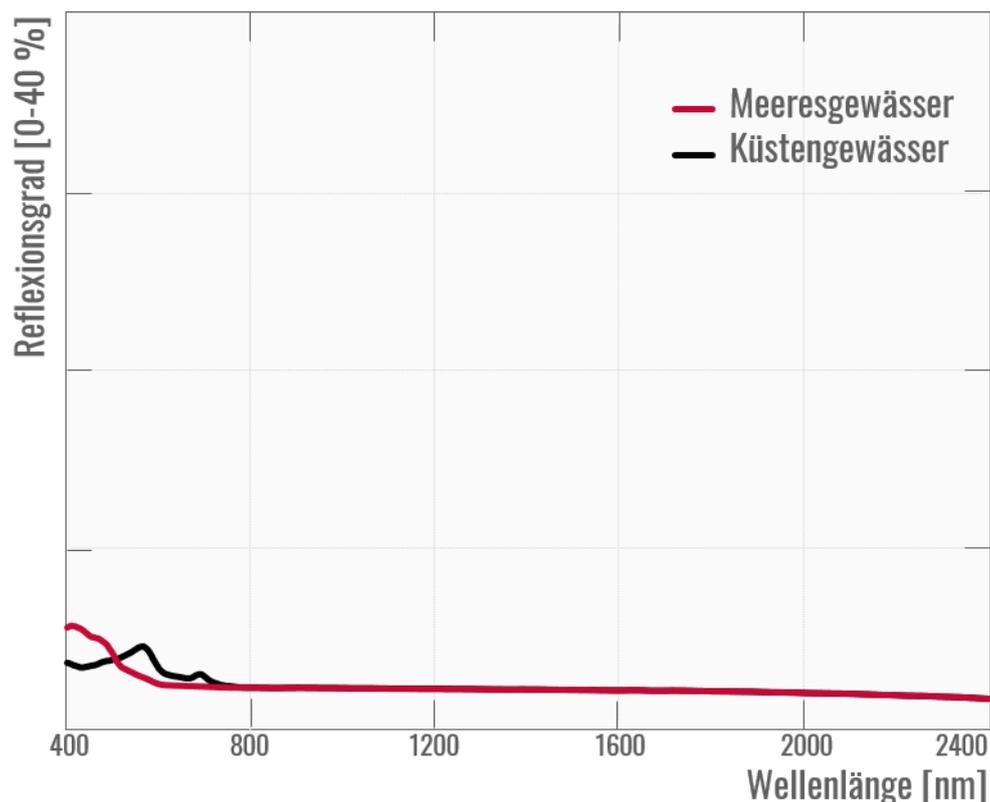
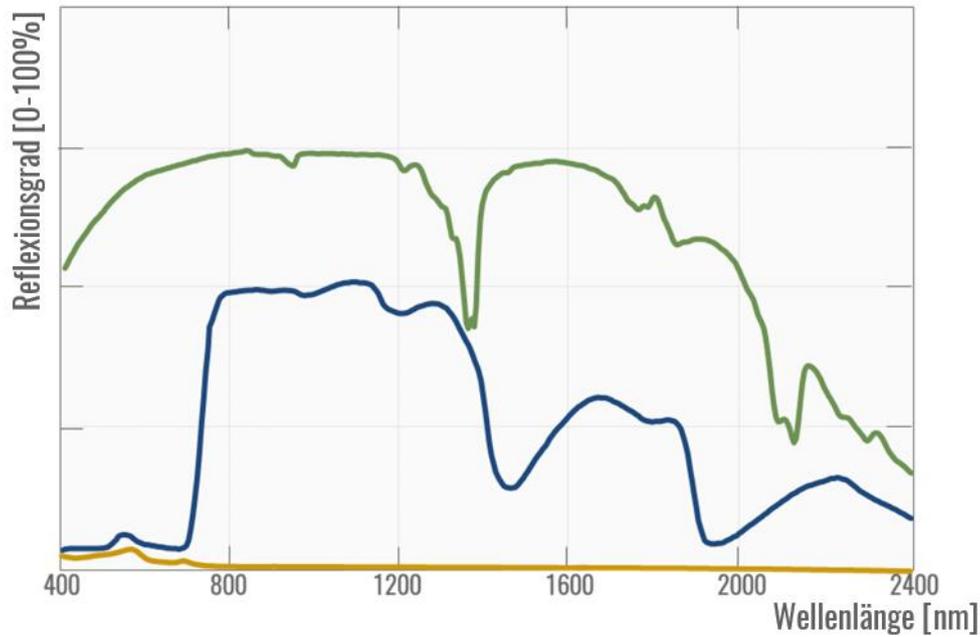


Abbildung 14 Reflexionsspektren von Meeres- und Küstengewässern.
USGS Spectral Library Version 7

Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Spektraler Reflexionsgrad ausgewählter Oberflächenmaterialien

Das Diagramm zeigt Spektren von drei verschiedenen Oberflächenmaterialien
- kannst du sie identifizieren?



Wähle die Elemente

Das grüne Spektrum ist ...

Wähle ein Element

Das blaue Spektrum ist ...

Wähle ein Element

Das gelbe Spektrum ist ...

Wähle ein Element

Wähle die beiden Oberflächenmaterialien aus, die spektral sehr ähnlich
sind:

- Flüssiges Wasser
- Grüne Vegetation
- Trockene Vegetation
- Offener Boden

3.7 Ressourcen-Abschnitt: Lektion “Grundlagen der abbildenden Spektroskopie“

In diesem Abschnitt haben wir die Ressourcen zusammengestellt, die für die Erstellung dieser Lektion verwendet wurden und die wir dir zur weiteren Lektüre empfehlen, da sie viele weitere Details enthalten. Bitte beachte, dass diese Auswahl keinen vollständigen Überblick über alle Ressourcen darstellt - wenn du denkst, dass eine wichtige Ressource fehlt, lass es uns wissen.

Fast alle Abbildungen dieses Vortrags findest du in der [HYPERedu-Foliensammlung](#), die auf EO-College verfügbar ist, wo du auch Kommentare zu den einzelnen Foliensammlungen hinterlassen kannst.

Zitieren als:

A. Brosinsky, T. Kuester, S. Foerster, H. Kaufmann, K. Segl, L. Guanter (2021). **Principles of imaging spectroscopy – Electromagnetic radiation and its interactions with earth surface materials**, slide collection, HYPERedu, EnMAP education initiative, German Centre for Geosciences GFZ . 1st revision March 2021, originally published October 2019.

Quellen und weiterführende Literatur

Thema: Was ist abbildende Spektroskopie?

Einige Diskussionen über die Begriffe **abbildende Spektroskopie** vs. **hyperspektrale Fernerkundung**:

- https://en.wikipedia.org/wiki/Imaging_spectroscopy
- https://en.wikipedia.org/wiki/Hyperspectral_imaging
- <https://avirisng.jpl.nasa.gov/>

Thema: Wichtige Meilensteine

- Foerster S., Guanter L., Lopez T., Moreno J., Rast M., Schaepman M.E. (2019): Guest Editorial: International Space Science Institute (ISSI) Workshop on Space-Borne Imaging Spectroscopy for Exploring the Earth's Ecosystems. *Surveys in Geophysics*. 40, 297–301. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09516-0>
- Goetz A.F.H, Vane G., Solomon J.E., Rock B.N. (1985): **Imaging Spectrometry for Earth Remote Sensing**. *Science*. 228, 4704. <https://doi.org/10.1126/science.228.4704.1147>

- MacDonald J., Ustin S.L., Schaepman M.E. (2009): **The contributions of Dr. Alexander F.H. Goetz to imaging spectrometry.** Remote Sensing of Environment. 113, S2–S4. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.10.017>
- Rast M., Painter T.H. (2019): **Earth Observation Imaging Spectroscopy for Terrestrial Systems: An Overview of Its History, Techniques, and Applications of Its Missions.** Surveys in Geophysics. 40, 303–331. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09517-z>
- Schaepman M.E., Ustin S.L., Plaza A.J., Painter T.H., Verrelst J., Liang S. (2009): **Earth system science related imaging spectroscopy—An assessment.** Remote Sensing of Environment. 113, S123–S137. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2009.03.001>
- Taramelli A., Tornato A., Magliozzi M.L., Mariani S., Valentini E., Zavagli M., Costantini M., Nieke J., Adams J., Rast M. (2020): **An Interaction Methodology to Collect and Assess User-Driven Requirements to Define Potential Opportunities of Future Hyperspectral Imaging Sentinel Mission.** Remote Sensing. 12, 1286. <https://doi.org/10.3390/rs12081286>
- Ustin S.L., McDonald J., Schaepman M.E. (2006): **A Review of the Contributions of Alexander F.H. Goetz to Imaging Spectroscopy.** IEEE. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.508>

Themen: Elektromagnetische Strahlung (EMR) und ihre Wechselwirkung mit der Atmosphäre und Oberflächenmaterialien

- Jensen J.R. (2007): **Remote Sensing Of The Environment: An Earth Resource Perspective.** 2nd Edition, Pearson.
- Lillesand T., Kiefer R.W. & J. Chipman (2008): **Remote Sensing and Image Interpretation.** 6th Edition, Wiley.
- Workman J. Jr & L. Weyer (2007): **Practical Guide to Interpretive Near-Infrared Spectroscopy.** CRC Press.
- Abbildung 5 Angepasst von Jensen J.R. (2007). **Remote Sensing Of The Environment: An Earth Resource Perspective.** 2nd Edition, Pearson & Lillesand T., Kiefer R.W. & J. Chipman (2008). **Remote Sensing and Image Interpretation.** 6th Edition
- Abbildung 7 von Küster T. (2011). **Modellierung von Getreidebestandsspektren zur Korrektur BRDF-bedingter Einflüsse auf Vegetationsindizes im Rahmen der EnMAP-Mission.** Dissertation [in Deutsch]
- Abbildung 8 & 10 angepasst von Jensen J.R. (2007). **Remote Sensing Of The Environment: An Earth Resource Perspective.** 2nd Edition, Pearson
- Abbildung 9 von ESA (2009). **Großbritannien und Irland, CC BY-SA 3.0 IGO**

Thema: Spektraler Reflexionsgrad von Oberflächenmaterialien

Geologie und Mineralien

- Hunt G.R. (1977): **Spectral Signatures of Particulate Minerals in the Visible and near Infrared.** Geophysics. 42 (3), 501–513. <https://doi.org/10.1190/1.1440721>

- Clark R.N. (1999): Chapter 1: **Spectroscopy of Rocks and Minerals, and Principles of Spectroscopy**. In: Rencz, A.N., Ed., Manual of Remote Sensing, Volume 3, Remote Sensing for the Earth Sciences, John Wiley and Sons, New York, 3-58. Soil:
- van der Meer F.D., van der Werff H.M.A, Van Ruitenbeek F.J.A. et. al (2012): **Multi- and hyperspectral geologic remote sensing: A review**. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 14 (1), 112–128. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.08.002>

Böden

- Ben-Dor E., Irons J.A., Epema A. (1999): **Manual of Remote Sensing, chap. Soil Reflectance**, pp. 111–188, NewYork: J. Wiley & Sons, Inc.
- Ben-Dor E., Chabrillat S., Demattê J.A.M., Taylor G.R., Hill J., Whiting M.L., Sommer S. (2009): **Using imaging spectroscopy to study soil properties**. Remote Sens Environ 113: S38–S55. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.09.019>
- Chabrillat S., Ben-Dor E., Cierniewski J., Gomez C., Schmid T., van Wesemael B. (2019): **Imaging Spectroscopy for Soil Mapping and Monitoring**. Surveys in Geophysics. 40, 361–399. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09524-0>
- Rossel R.V., Walvoort D.J.J., McBratney A.B., Janik L.J., Skjemstad J.O. (2006): **Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties**. Geoderma 131(1): 59–75. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007>

Vegetation

- Huete A.R. (2004): **Remote Sensing for Environmental Monitoring**. In: Artiola, J.F., Pepper, I.L, and M.L. Brussea (Eds), Environmental Monitoring and Characterization, Elsevier Academic Press, 183-206.
- Ustin S., Roberts D., Gamon J., Asner G., Green R. (2004): **Using imaging spectroscopy to study ecosystem processes and properties**, Bioscience, 54 (6), 523–534. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2004\)054\[0523:U1STSE\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2004)054[0523:U1STSE]2.0.CO;2)
- Gamon J.A., Somers B., Malenovský Z. et al. (2019) **Assessing Vegetation Function with Imaging Spectroscopy**. Surveys in Geophysics. 40, 489–513. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09511-5>

Binnen- und Küstengewässer

- Giardino C., Brando V. E., Gege P., Pinnel N., Hochberg E., Knaeps E., Reusen I., Doerffer R., Bresciani M., Braga F., Foerster S., Champollion N., Dekker A. (2019): **Imaging Spectrometry of Inland and Coastal Waters: State of the Art, Achievements and Perspectives**. Surveys in Geophysics. 40, 401-429. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9476-0>

Finales Quiz: Lektion 'Grundlagen der abbildenden Spektroskopie'

In diesem abschließenden Quiz zur Lektion "Grundlagen der abbildenden Spektroskopie" haben wir 10 Fragen für dich vorbereitet. **Du musst 50 % der Fragen richtig beantworten**, um zur nächsten Lektion zu gelangen. Du hast eine **unbegrenzte Anzahl von Versuchen, um das Quiz zu bestehen**. Viel Glück!

Um das Zertifikat zu erhalten, musst du die Lektionsquizze (3) sowie das abschließende Quiz in der Online-Version des Kurses bestehen.

Was ist der Hauptunterschied zwischen optischen multispektralen und hyperspektralen Daten? (Mehrfachauswahl)

- Die Beleuchtungsquelle
- Die erfassten Wellenlängenbereiche
- Die Anzahl der aufgenommenen Bänder
- Kontinuierliche vs. diskrete Bänder

Kannst du die wichtigsten Meilensteine der hyperspektralen Fernerkundung den entsprechenden Zeiträumen zuordnen?

Wähle das jeweilige Element

- | | |
|--------------------|-------------------|
| Zwischen 1982-1985 | Wähle ein Element |
| Zwischen 2000-2001 | Wähle ein Element |
| Zwischen 2018-2019 | Wähle ein Element |
| Zwischen 2022-2027 | Wähle ein Element |

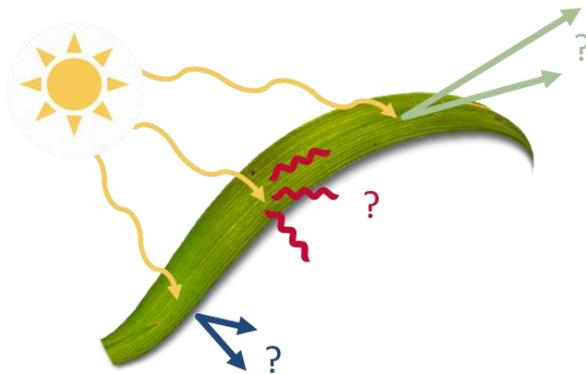
In welchen Wellenlängenbereichen erfassen VNIR (sichtbarer Bereich und nahes Infrarot) Sensoren Daten? (Mehrfachauswahl)

- 380 – 1300 nm
- 0.38 – 1.3 μm
- 380 – 1300 μm
- 3.8 – 1.3 nm

In welchen Wellenlängenbereichen erfassen SWIR-Sensoren (kurzwelliges Infrarot) Daten? (Einfachauswahl)

- 380 – 1300 nm
- 1300 – 3000 nm
- 3000 – 5000 nm
- 8000 – 12000 nm

Welche Prozesse laufen ab, wenn Strahlung mit Oberflächenmaterialien in Wechselwirkung tritt? (Mehrfachauswahl)



- Transmission
- Apparition
- Reflexion
- Absorption

Was sind atmosphärische Fenster? (Einfachauswahl)

- Wellenlängenbereiche, die für Strahlung weitgehend durchlässig sind
- Wellenlängenbereiche, die für Strahlung weitgehend undurchlässig sind
- Wolkenfreie Zielgebiete
- Satellitenumlaufbahnen

Welche Charakteristiken von Absorptionsmerkmalen ermöglichen die Identifizierung von Materialien? (Einfachauswahl)

- Tiefe
- Lücken
- Farbe
- Form und Position

Fülle die Lücken aus (Optionen: seismische Prozesse, akustische Prozesse, Schwingungsprozesse):

Der wichtigste Prozess für die optische Fernerkundung ist die Absorption. Strahlungsenergie, die auf ein Objekt trifft, stimuliert den Elektronentransfer und auf molekularer Ebene.

Der spektrale Reflexionsgrad der Vegetation ist im sichtbaren Bereich sehr niedrig. Warum? (Mehrfachauswahl)

- Aufgrund der Zellstruktur
- Aufgrund von Blattpigmenten
- Durch die Absorption von Licht für die Photosynthese
- Die spektrale Reflexion der Vegetation ist im sichtbaren Bereich besonders hoch

Welches Oberflächenmaterial hat in der Regel den geringsten Reflexionsgrad im SWIR: (Einfachauswahl)

- Klares Wasser
- Grüne Vegetation
- Trockene Vegetation
- Offener Boden

4 Grundlagen der Sensortechnologien und Datenerfassungstechniken

Willkommen zu unserer zweiten thematischen Lektion! Hast du dich in der ersten Lektion schon gefragt, wie solche hochdimensionalen Daten erfasst und erzeugt werden? Was sich vielleicht technisch und langweilig anhört, ist in Wirklichkeit eine wirklich unterhaltsame Lektion, denn wir haben noch mehr interaktive Inhalte und Videos produziert! Nach einer Einführung in einige **allgemeine Konzepte, wie (abbildende) Spektrometer Daten erfassen** und welche **Eigenschaften diese Daten** haben, wirst du die Gelegenheit haben, eine Reihe von weltraumgestützten und luftgestützten (und bodengestützten) **Instrumenten zu erkunden und uns bei der Datenerfassung im Labor und im Feld zu begleiten**. Charly gibt dir in dem folgenden Video weitere Details zu den Lernzielen.

VIDEO: Basic-09: Sensor technologies & data acquisition techniques: Lesson Intro
(Sensortechnologien und Datenerfassungstechniken: Lektion Intro)



URL of the video:

<https://www.youtube.com/watch?v=k82wyfOZrA4>

Lass uns mit dem ersten Thema dieser Lektion fortfahren.

4.1 Einführung in die Sensortechnologien

Wissenschaftliche und anwendungsspezifische Anforderungen sowie die technische Machbarkeit bestimmen das Design (oder in den meisten Fällen die Wahl) des Sensors:

- Welche Oberflächeneigenschaften sollen erfasst werden?
- Mit welcher Auflösung und Genauigkeit sollen die Eigenschaften erfasst werden?
- Wo sollen die Eigenschaften erfasst werden?
- Wie oft sollen die Eigenschaften erfasst werden?
- Wie lange sollen die Eigenschaften erfasst werden?

Diese Anforderungen definieren die **räumliche, spektrale, radiometrische und zeitliche Auflösung** eines Sensors. "Keine Eigenschaft von Bildern wird häufiger zitiert und gleichzeitig falsch verwendet als die Auflösung. Es handelt sich um einen Begriff, der eine starke intuitive Bedeutung hat, aber schwer quantitativ zu definieren ist" (Schowengerdt, 2007). Dabei hängt die zeitliche Auflösung hauptsächlich mit den Eigenschaften der Satellitenbahn zusammen, während die anderen Auflösungen die Sensoreigenschaften betreffen.

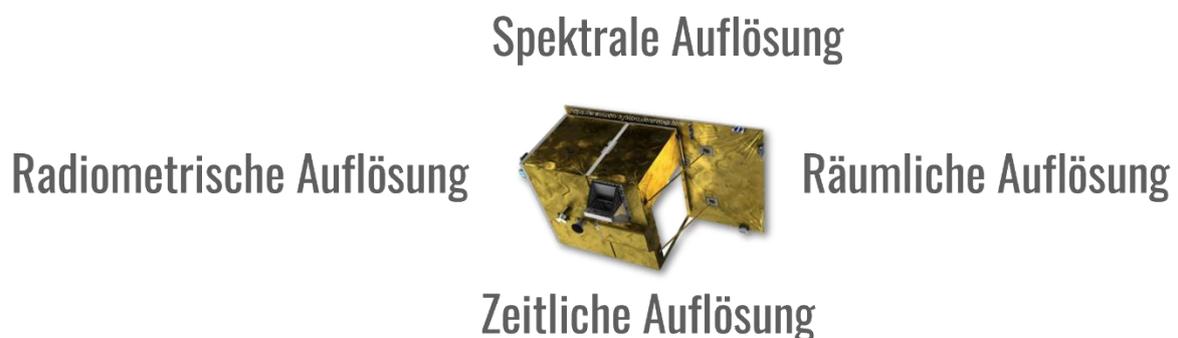


Abbildung 15 Die Auflösungen eines Sensors werden durch wissenschaftliche Anforderungen und technische Machbarkeit bestimmt.

EnMAP-Satellitenbild angepasst mit Genehmigung der DLR Raumfahrt-Agentur

Im folgenden Abschnitt werden die Auflösungsarten genauer beschrieben. Vorerst sei nur daran erinnert, dass ein Datenprodukt der abbildenden Spektroskopie durch die potenzielle Anwendung bestimmt wird und aus einer Interaktion zwischen beiden resultiert:

- verwendete oder realisierbare Sensortechnik,
- die Art der Datenerfassung und deren Parametrisierung und
- die erstellten und resultierenden Dateneigenschaften

Leider gibt es **Kompromisse zwischen den Auflösungen**, d. h. man kann beispielsweise keine Bilder mit sehr hoher räumlicher UND hoher spektraler Auflösung aufnehmen, ohne dass die radiometrische Qualität leidet, wie später noch gezeigt wird.

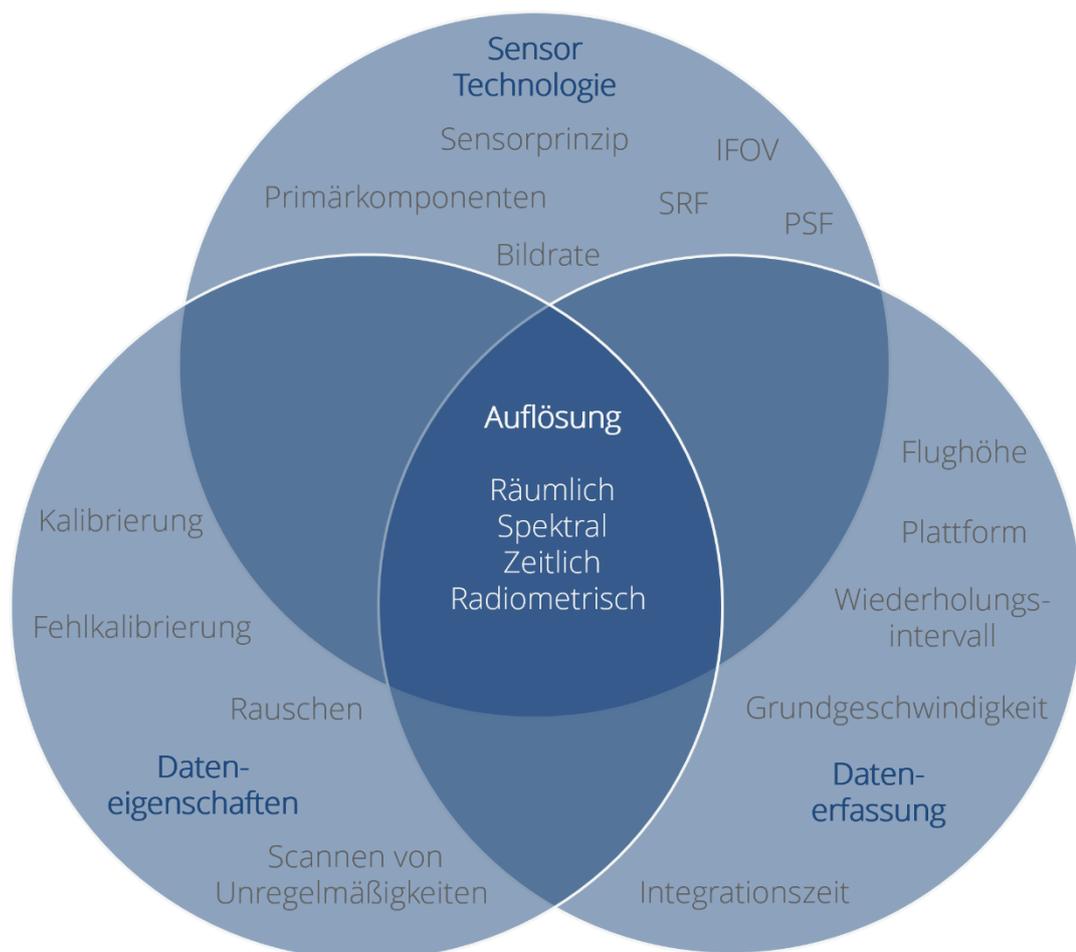


Abbildung 16 Das finale Datenprodukt - und seine Auflösungen - wird durch das Zusammenspiel von Sensortechnologie, Datenerfassung und Eigenschaften bestimmt.

Mit freundlicher Erlaubnis von Maximilian Brell

4.2 Dateneigenschaften - die 4 Auflösungen

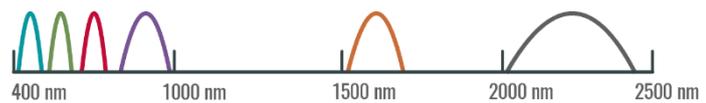
Spektrale Auflösung

Der Spektralbereich ist definiert durch den **Teil des elektromagnetischen Spektrums, für den ein Instrument empfindlich ist, sowie durch die Position, Anzahl und Breite seiner Spektralbänder.** Abbildende Spektrometer erfassen in der Regel Daten in Hunderten von kontinuierlichen (zusammenhängenden) spektralen Bändern innerhalb eines begrenzten Spektralbereichs.

"Eine kontinuierliche spektrale Abdeckung zwischen 400 und 2500 nm mit einem spektralen Abtastintervall bei einem Full Width at Half Maximum (FWHM) von höchstens 10 nm wird von Sensoren für die Landbeobachtung angestrebt, um die Atmosphäre zu charakterisieren und den Reflexionsgrad zu ermitteln sowie einige geophysikalische, geo-biophysikalische und geochemische Daten für Umweltmessungen und landwirtschaftliche Anwendungen zu erheben. Für Sensoren zur Ozeanbeobachtung, die sich häufig auf die Variable der "Ozeanfarbe" konzentrieren, ist ein spektrales Abtastintervall von etwa 5 nm

Multispektraler Sensor

(2 bis 15 ausgewählte Kanäle bei diskreten Wellenlängen des optischen Spektrums)



Hyperspektraler Sensor

(Hunderte von Kanälen liefern eine nahezu kontinuierliche Messung des optischen Spektrums)

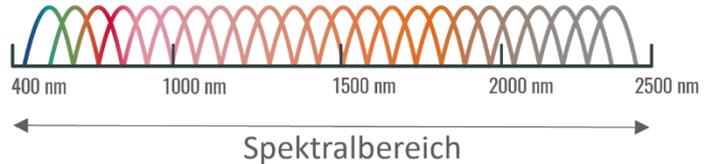


Abbildung 17 Der Unterschied zwischen einem Multi- und einem Hyperspektralsensor Brosinsky et al. (2022)

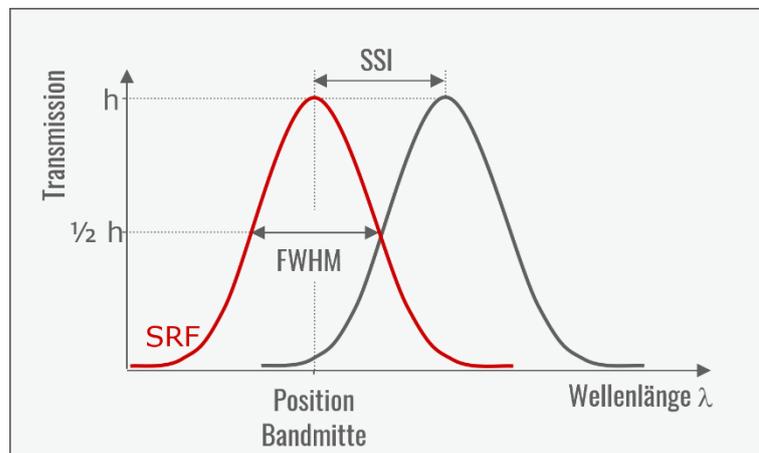


Abbildung 18 Das spektrale Abtastintervall (SSI) beschreibt den spektralen Abstand der Bänder, während das Full Width at Half Maximum (FWHM) die Breite der Bänder beschreibt, da sie keine scharfen Grenzen haben (spectral response function (SRF)).

Mit freundlicher Erlaubnis von Theres Kuester

erforderlich. Für die Messung von Strahlungseinflüssen durch Verunreinigungen im Schnee sind 20 nm die allgemein akzeptierte Anforderung" (Rast und Painter 2019).

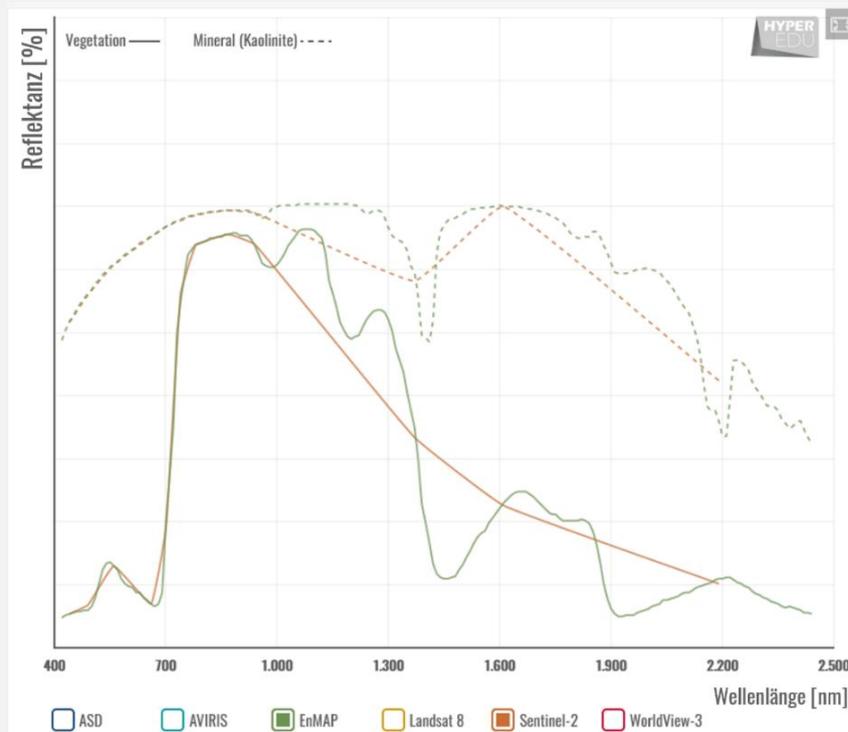


Interaktive Grafiken

Du musst unter EO College eingeschrieben und eingeloggt sein, um zu den interaktiven Diagrammen weitergeleitet zu werden. Die Abbildungen sind jedoch in dieser Offline-Version enthalten. Für ein optimales Lernerlebnis empfehlen wir dir, die Diagramme online anzusehen.



Interaktive Grafik zu verschiedenen spektralen Auflösungen



Interaktive Abbildung 3: Hier kannst du untersuchen, wie verschiedene gängige Multi- und Hyperspektralsensoren wie EnMAP und Sentinel 2 dasselbe Objekt erfassen würden.

Räumliche Auflösung

Die räumliche Auflösung ist ein **Maß für das kleinste Bodenmerkmal, das von einem Sensor aufgelöst werden kann**. Da ihre Beschreibung nicht so einfach ist, gibt es eine Vielzahl von Maßstäben:

- Das **momentane Sichtfeld (instantaneous-field-of-view, IFOV)** ist der Bereich der Einfallswinkel, die von einem einzelnen Detektorelement gesehen werden. Die **entsprechende Bodenabdeckung (bodenprojizierter Instantaneous-Field-of-View, GIFOV)**, definiert in Metern, hängt von der Satellitenhöhe ab und variiert mit dem Sichtwinkel.

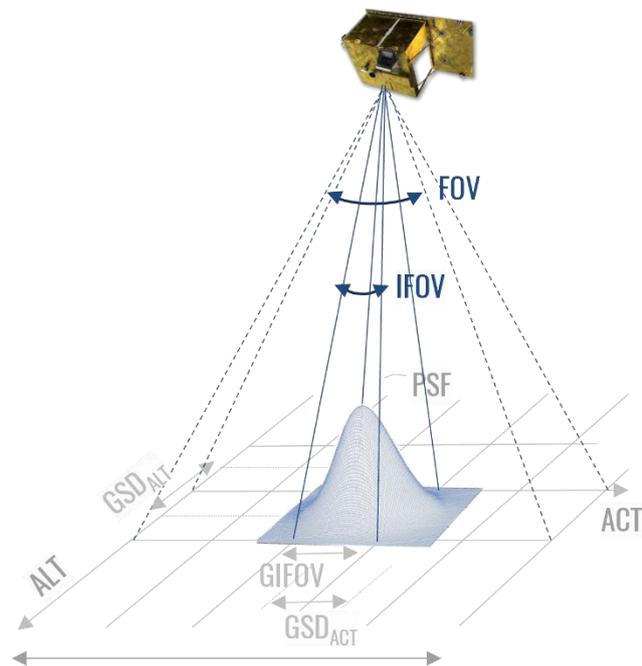


Abbildung 19 Metriken zur Beschreibung der räumlichen Auflösung.

Angepasst von Schowengerdt (2007). EnMAP-Satellitenbild angepasst mit Genehmigung der Raumfahrt-Agentur des DLR

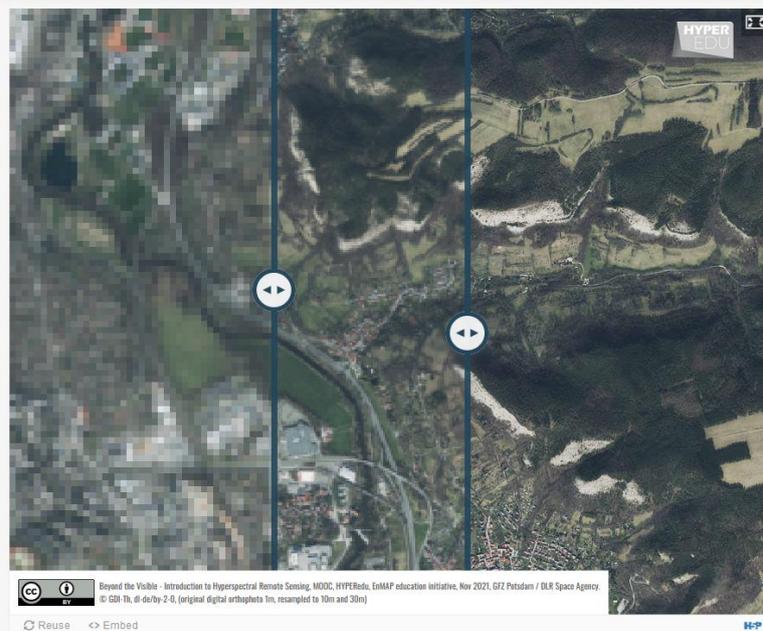
- Der **Bodenabtastabstand (ground sampling distance, GSD)** ist der Abstand zwischen den Pixelzentren am Boden und daher mehr oder weniger identisch mit dem GIFOV, obwohl die GSD mathematisch gesehen ein Liniensegment und das GIFOV eine Fläche ist. Der GSD wird auch als räumlicher Abtastabstand (SSD) oder Bodenabtastintervall (GSI) bezeichnet.
- Die genaueste Art, die räumliche Auflösung eines abbildenden Instruments zu beschreiben, ist die Modulationsübertragungsfunktion (modulation transfer function, MTF), die die Menge des vom Objekt auf das Pixel übertragenen Kontrasts quantifiziert. Die MTF entspricht der Magnitude der optischen Transferfunktion (OTF), die wiederum definiert ist als die Fourier-Transformierte der Punktstreuungsfunktion (PSF).

Die **räumliche Auflösung in Querrichtung (Across-Track, ACT)** und in **Längsrichtung (Along-Track, ALT)** wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst (z.B. Integrationszeit, Schmiereffekte) und ist daher **nicht unbedingt identisch**, obwohl dies natürlich das gewünschte Ergebnis des Instrumentendesigns ist.

Da Pixel in Bildern in der Regel als Rechtecke dargestellt werden, wird die räumliche Auflösung eines Sensors oft mit z.B. 30 m x 30 m (im Falle von EnMAP) angegeben. Dabei handelt es sich um einen Mittelwert, da dieser von der Entfernung zwischen Sensor und Erde, der Sensorgeschwindigkeit und der FOV/Off-Nadir-Ausrichtung abhängt. In der interaktiven Grafik unter diesem [LINK](#) kannst du die Szene in 30 m (z. B. Landsat, EnMAP), 10 m (z. B. Sentinel-2) und 1 m (Luftbildsensor) Auflösung* betrachten.



**Interaktive Grafik für verschiedene räumliche
Auflösungen** Verfügbar unter diesem [LINK](#).



Interaktive Abbildung 4: **Verschiedene räumliche Auflösungen**

**Je nach Gerät kann die höchste Auflösung ungenauer als 1m x 1m erscheinen. Du kannst versuchen, den Eindruck zu verbessern, indem du die Grafik im Vollbildmodus betrachtest.*

Zeitliche Auflösung

Die zeitliche Auflösung bezieht sich auf den zeitlichen Abstand zwischen zwei Erfassungen eines Sensors über demselben Gebiet. Sie **hängt von der Höhe der Satellitenbahn und ihrer Geometrie (Wiederholungszyklus) ab** - optische Sensoren für die Umweltbeobachtung folgen in der Regel sonnensynchronen, nahezu polaren Bahnen. Je größer der Neigungswinkel ist ($98,2^\circ$ in dem hier gezeigten Beispiel), desto geringer ist der maximal beobachtbare Breitengrad. Der **Einsatz mehrerer Satelliten oder Ausrichtungsmöglichkeiten** kann die Wiederholungsrate erhöhen. In der Realität kann die tatsächliche Datenmenge jedoch aufgrund der Wolkenbedeckung stark schwanken. Bei der Betrachtung der zeitlichen Reichweite eines Sensors sollte man auch die Lebensdauer einer Mission berücksichtigen.

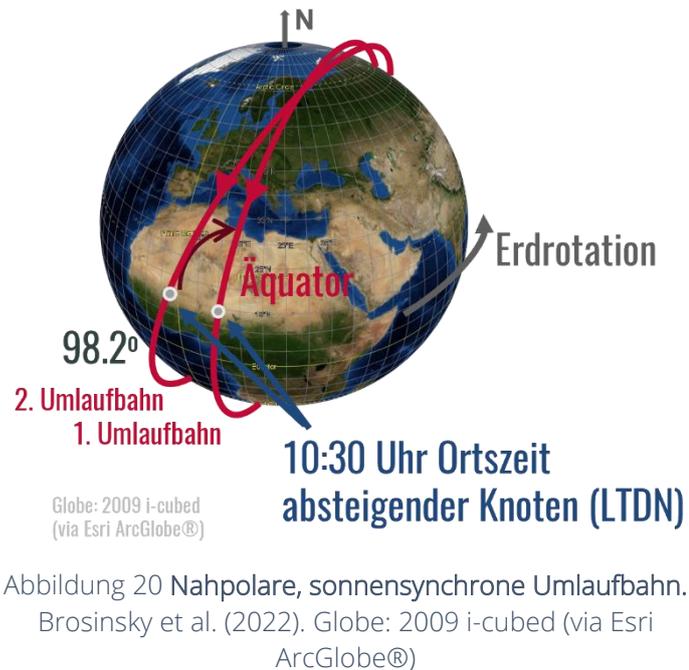


Abbildung 20 Nahpolare, sonnensynchrone Umlaufbahn.
Brosinsky et al. (2022). Globe: 2009 i-cubed (via Esri ArcGlobe®)

Radiometrische Auflösung

Und schließlich ist die radiometrische Auflösung definiert als die **Fähigkeit eines Sensors, Unterschiede in der Strahlung zu erfassen**. Je feiner die radiometrische Auflösung ist, desto besser können kleine Unterschiede differenziert werden. Üblich sind acht und zwölf Bit (256 bzw. 2048 Grauwerte). Neuere Sensoren wie EnMAP haben 14 Bit (16384 Grauwerte). Bei der radiometrischen Auflösung geht es jedoch nicht nur um

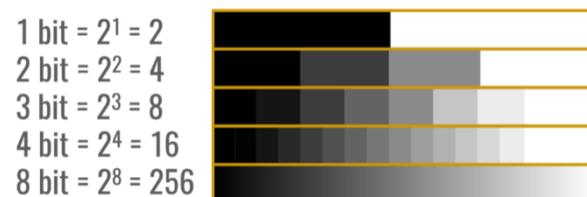


Abbildung 21 Schematische Darstellung der radiometrischen Auflösung. Brosinsky et al. (2022)

die Anzahl der Bits, sondern vielmehr um "die kleinste Differenz im Signal, die nicht durch Rauschen überdeckt wird".

Kompromisse

Wie bereits zu Beginn dieses Themas erwähnt, gibt es leider **einige typische Kompromisse zwischen den Auflösungen**. Die Menge der Photonen, die von einem Sensor über alle Wellenlängen hinweg gemessen werden kann, ist durch die Sonneneinstrahlung und die Oberflächenreflexion begrenzt. Weniger Photonen würden zu einem niedrigeren SNR (Signal-Rausch-Verhältnis, ein Maß für die radiometrische Qualität) und damit

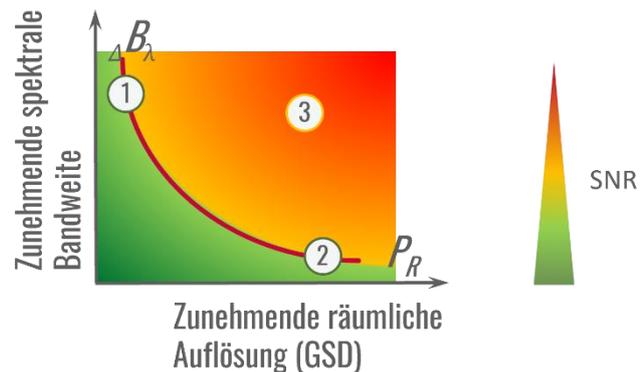


Abbildung 22 Typische Kompromisse zwischen räumlicher und spektraler Auflösung. Mit freundlicher Erlaubnis von Karl Segl

zu einer schlechteren späteren Parametererfassung führen. Bei der **Beziehung zwischen räumlicher und spektraler Auflösung gilt: Je höher die räumliche Auflösung, desto geringer die spektrale Auflösung, um die gleiche Anzahl von Photonen auf dem Detektor zu erhalten**. Das bedeutet, dass man entweder ein Bild mit hoher spektraler, aber eher geringer räumlicher Auflösung (1), ein Bild mit hoher räumlicher, aber geringer spektraler Auflösung (2) oder etwas dazwischen (beide mittlere Auflösung) erhält. Bei der Entwicklung von Sensoren wird versucht, ein niedriges SNR (3) zu vermeiden und den besten Kompromiss zwischen spektraler und räumlicher Auflösung und einem hohen SNR für eine bestimmte Anwendung zu finden.

Neben der räumlichen und der spektralen Auflösung, die über die Photonenmenge (dargestellt durch SNR) miteinander verbunden sind, gibt es einen gewissen **Kompromiss zwischen räumlicher und zeitlicher Auflösung**: Kleinere Pixel führen zu einer geringeren Schwadbreite (Abdeckung), was im Allgemeinen eine geringere zeitliche Auflösung bedeutet, während eine höhere zeitliche Auflösung in der Regel mit einem größeren IFOV und damit größeren Pixeln einhergeht. Dieser Kompromiss kann durch den Start mehrerer identischer Sensoren überwunden werden, wie z. B. bei Sentinel-2 A und B. Allerdings sind weltraumgestützte abbildende Spektrometer so komplex und die Technologie noch in der Entwicklung, dass dies keine Option ist - noch nicht.

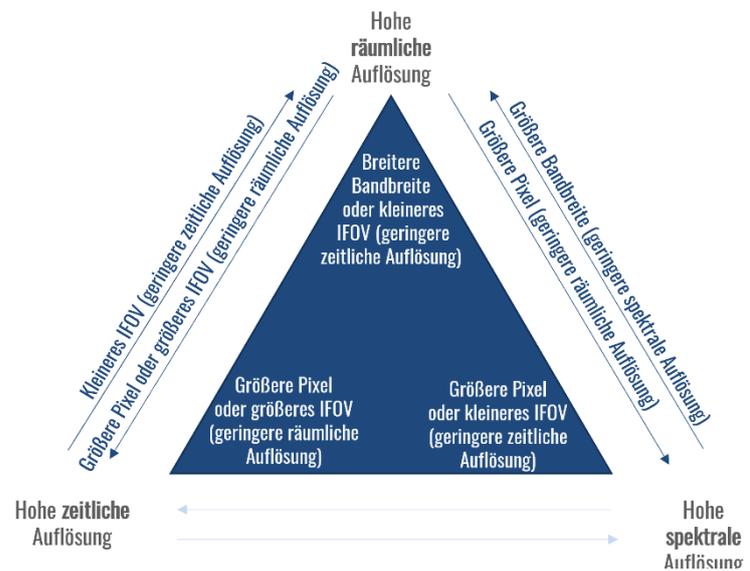


Abbildung 23 **Typische Kompromisse zwischen räumlicher, spektraler und zeitlicher Auflösung.**

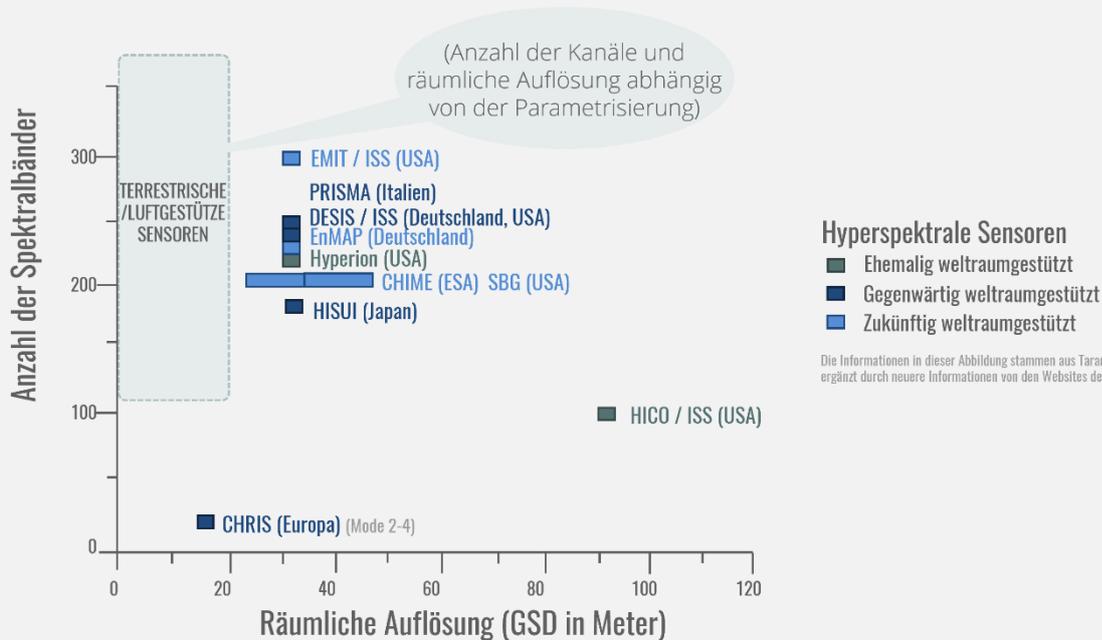
Brosinsky et al. (2019)



Interaktive Grafik - Weltraumgestützte Sensoren

Verfügbar unter diesem [LINK](#).

Die **folgende interaktive Grafik** zeigt eine Auswahl vergangener, gegenwärtiger und zukünftiger weltraumgestützter Sensoren. Schau dir ihre **räumliche und spektrale Auflösung im Vergleich** zu terrestrischen und flugzeuggestützten Sensoren an. Wenn du mit der Maus über die Sensoren fährst, erhältst du nähere Informationen zu den jeweiligen Missionen.



Interaktive Abbildung 5: Auswahl vergangener, gegenwärtiger und zukünftiger weltraumgestützter Sensoren (Stand 2022)

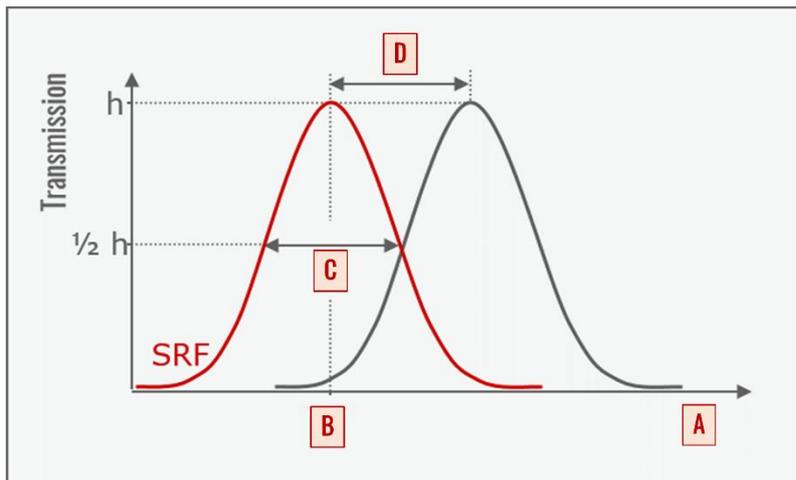
Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Dateneigenschaften – die 4 Auflösungen

Wir unterscheiden vier Arten von Auflösungen - kannst du sie benennen?

1. Auflösung
2. Auflösung
3. Auflösung
4. Auflösung

Beschrifte die Grafik der spektralen Antwortfunktionen (SRF) entsprechend:
(Optionen: Position Bandmitte, Wellenlänge, FWHM, SSI)



- A Wähle ein Element
- B Wähle ein Element
- C Wähle ein Element
- D Wähle ein Element

Welche Pixelgröße gehört zu welchem Sensor (Drag and Drop)?

Sortiere die Elemente (Optionen: 5m, 30m, 17m, 90m)

PRISMA (VNIR/SWIR-hyp) Wähle ein Element

AVIRIS (Luftgestützt) Wähle ein Element

HICO Wähle ein Element

CHRIS / PROBA (mode 2-5) Wähle ein Element

Die zeitliche Auflösung hängt ab von ... (Mehrfachauswahl)

- Merkmale der Satellitenumlaufbahn (Wiederholungszyklus)
- die Nutzung mehrerer Satelliten
- Ausrichtungsmöglichkeiten
- Abgedeckter Spektralbereich

Leider gibt es einige typische Kompromisse zwischen den Auflösungen. In der Beziehung zwischen räumlicher und spektraler Auflösung gilt: Je höher die eine ist, desto geringer muss die andere sein ... (Einfachauswahl)

- ... um die Datengröße überschaubar zu halten.
- ... um die gleiche Menge an Photonen auf dem Detektor zu erhalten.
- ... um eine akzeptable zeitliche Auflösung zu erreichen.
- ... um rechteckige Pixel zu ermöglichen.

4.3 Abbildende Spektroradiometer – allgemeine Elemente

Nachdem du nun etwas Hintergrundwissen über die Definitionen der **räumlichen, spektralen, radiometrischen und zeitlichen Auflösung** eines Datensatzes hast, können wir uns die Sensortechnologie genauer ansehen. Es gibt **verschiedene Scan-Systeme mit entsprechenden Unterschieden in den Prinzipien und Eigenschaften der Datenerfassung**. Im Bereich der abbildenden Spektroskopie sind **Pushbroom-Sensoren (oder räumlich scannende Sensoren) sowohl in luftgestützten als auch in terrestrischen Systemen am weitesten verbreitet**, weshalb wir uns auf diese Art von Systemen konzentrieren werden. Charly erklärt im folgenden Video die allgemeinen Elemente eines Pushbroom-Scanners, bevor wir schließlich einige Erfahrungen mit der Datenerfassung auf verschiedenen Ebenen austauschen:

VIDEO: Basic-10: Sensor technologies & data acquisition techniques: Imaging Spectrometer (*Sensortechnologien & Datenerfassungstechniken: Abbildende Spektrometer*)

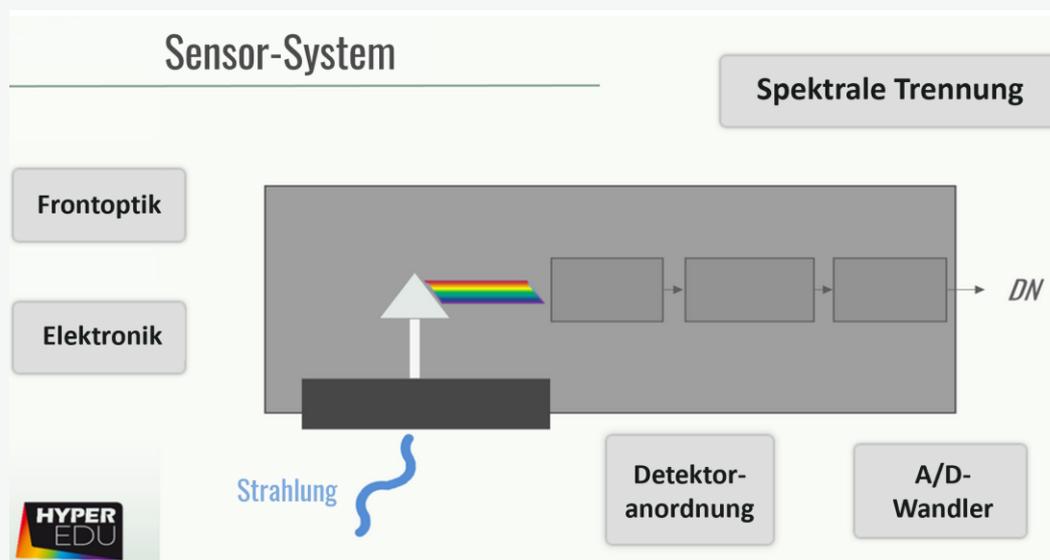


URL of the video:

<https://www.youtube.com/watch?v=-Kedx--a48>

VIDEO: Sensortechnologien & Datenerfassungstechniken: Abbildende Spektrometer

Hoppla, welches Teil gehört wohin? Hilf uns, den Sensor wieder zusammenzubauen!



Welches System ist nach deiner Einschätzung sowohl bei weltraumgestützten als auch bei luftgestützten (Flugzeug) Systemen am weitesten verbreitet?

- Gekacheltes Scannen (Tiled scanning)
- Whiskbroom Scannen
- Räumlich-spektrales Scannen (Spatio-spectral scanning)
- Pushbroom Scannen

Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Abbildende Spektroradiometer – allgemeine Elemente

In welchem Format werden die Daten vom Sensor erfasst?

(Einfachauswahl)

- Digitale Zahlen
- Reflexionsgrad an der Oberfläche
- Top-of-Atmosphere Strahlung
- Top-of-Atmosphere Reflexion

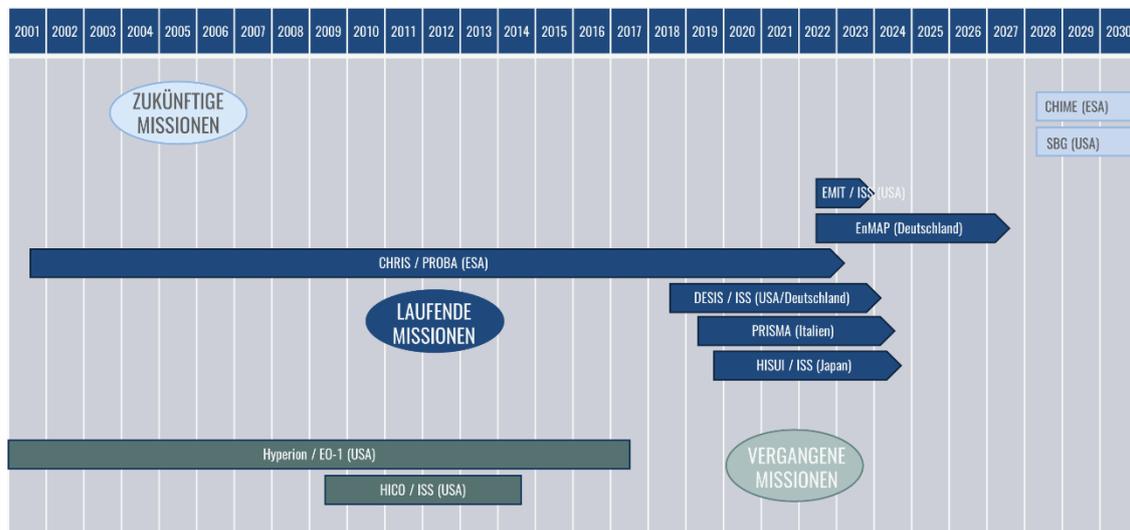
4.4 Datenerfassung: weltraumgestützt

In dem Abschnitt über die wichtigsten Meilensteine in der vorherigen Lektion hast du bereits gelernt, dass die ersten weltraumgestützten Hyperspektralmissionen in den frühen 2000er Jahren gestartet wurden. Seitdem sind mehrere abbildende Spektroskopie-Sensoren in den Weltraum geflogen und weitere Systeme sind in der Entwicklung, die in den nächsten Jahren gestartet werden sollen. Entweder an Bord frei fliegender Satellitenplattformen oder an Bord der Internationalen Raumstation (ISS), die bereits mehrere abbildende Spektrometer wie HICO, DESIS und HISUI beherbergt (hat). Bitte beachte, dass wir uns in diesem MOOC auf nicht-kommerzielle Missionen mit freier Datenpolitik konzentrieren.



Interaktive Grafik - Zeitstrahl für Hyperspektralsatelliten

Verfügbar unter diesem [LINK](#).



Interaktive Abbildung 6 **Zeitstrahl für Hyperspektralsatelliten**. Die Informationen in dieser Abbildung basieren auf der vom EnMAP-Bodensegmentteam erstellten Zusammenstellung von Missionen der abbildenden Spektroskopie im Weltraum (Stand August 2020). Sie wurde für ausgewählte Missionen aktualisiert, die in der überarbeiteten Version dieses MOOCs im November 2022 vorgestellt wurden.

Die Umlaufbahn eines Satelliten beschreibt die Bahn, auf der ein Satellit um die Erde kreist. Abbildende Spektrometer auf **frei fliegenden Satellitenplattformen**, die zur Umweltüberwachung eingesetzt werden, folgen im Allgemeinen sonnensynchronen, nahezu polaren Umlaufbahnen. Die Bahnneigung liegt typischerweise bei 98° - 99° für Höhen von 650-900 km bei immer gleicher Position der Sonne (daher sonnensynchron). Mit anderen Worten, der Satellit passiert jeden Tag etwa zur gleichen Ortszeit denselben Breitenkreis der Erde.

Die **ISS-Umlaufbahn** hingegen ist nicht sonnensynchron, was zu unterschiedlichen Beobachtungs- und Beleuchtungsbedingungen führt. Die ISS bewegt sich auf einer Umlaufbahn mit einer Neigung von $51,6^{\circ}$ von West nach Ost und deckt Gebiete von 55° N bis 52° S ab. Die ISS-Umlaufbahnen werden im Regelfall alle 3 bis 5 Tage wiederholt.

Die Zeiten der Überflüge variieren jedoch stark, was zu unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen während der Erfassung führt. Auch die Höhe der ISS über der Erde variiert. Sie beträgt etwa 400 km, kann aber typischerweise in einem Bereich von 370 km bis 460 km variieren.

Die meisten vom Menschen geschaffenen Objekte im Weltraum befinden sich in einer niedrigen Erdumlaufbahn (Low Earth Orbit, LEO), d.h. erdzentriert mit einer Höhe < 2.000 km oder einer Umlaufzeit < 128 Minuten. **Der Downlink ist in der Regel auf 10-12 Minuten für die Datenübertragung begrenzt** (wegen der Sichtbarkeit der Bodenstationen), unter Verwendung des S-Bandes (bis zu 6 Mbit/s), des X-Bandes (bis zu 150 Mbps oder 300 Mbp/s dual polarisiert) oder des Ka/Ku-Bandes (~ 1 Gbp/s). Das Tracking and Data Relay Satellite System (TDRSS) ist ein Netz amerikanischer Kommunikationssatelliten und Bodenstationen, das für die Weltraumkommunikation eingesetzt wird, um die Zeit, in der die Raumfahrzeuge mit dem Boden in Verbindung stehen, zu verlängern und damit die Datenübertragung zu verbessern.

EnMAP

Du hast in diesem MOOC schon einige Male über den EnMAP-Sensor gehört. Nun ist es an der Zeit, einen genaueren Blick darauf zu werfen und die Eigenschaften des EnMAP-Orbits und des Instruments etwas detaillierter vorzustellen. Aber lass uns zuerst **EnMAP in der folgenden Animation in Betrieb sehen**.

VIDEO: Basic-05: Sensor technologies & data acquisition techniques: EnMAP Mission
(Sensortechnologien und Datenaufnahmetechniken : EnMAP Mission)



URL of the video: <https://www.youtube.com/watch?v=LQZntLp3RfM>

Der Sensor deckt eine **Schwadbreite von 30 km mit einem Bodenabtastabstand von 30 m × 30 m** ab. Die Along-Track-Dimension ist durch die Satellitenbewegung gegeben. Pro Tag können **Daten mit einer Länge von bis zu 5000 km** gesammelt und mittels des X-Bands mit 320 Mbits/s in 31 Minuten/Tag heruntergeladen werden. Die gewählte sonnensynchrone Umlaufbahn in Verbindung mit einer **um ±30° vom Nadir abweichenden Ausrichtung** ermöglicht es, ermöglicht es, jeden Punkt der Erde innerhalb von 4 Tagen und im Nadir-Blick innerhalb von 27 Tagen zu erfassen.

EnMAP ist ein abbildendes Pushbroom-Spektrometer mit einem prismenbasierten Doppelspektrometer, das den Spektralbereich von 420-2450 nm abdeckt: ein VNIR-System (420-1000 nm) und ein SWIR-System (900-2450 nm). Die Schwellenanforderungen für das Signal-Rausch-Verhältnis (SNR) sind

- VNIR >500:1 (@495 nm)
- SWIR > 150:1 (@2200 nm)

und die Unsicherheit der Spektralkalibrierung

- VNIR 0.5 nm
- SWIR 1 nm

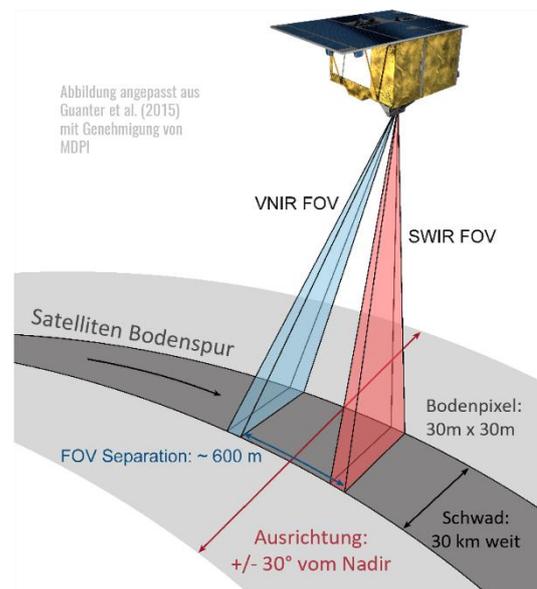


Abbildung 24 Schematische Darstellung einer EnMAP-Überfliegung. Nachgedruckt von Guanter et al. (2015) mit Genehmigung vom MDPI

Die erforderliche radiometrische Kalibrierungsgenauigkeit beträgt 5 % und die Co-Registrierung VNIR-SWIR < 20 % eines Pixels.

Vielleicht ist dir die unterschiedliche Anzahl von Bändern des EnMAP-Sensors aufgefallen, die im Video und im Datenblatt der Mission erwähnt werden. In der Tat werden insgesamt 246 Bänder vom Sensor aufgezeichnet. Allerdings werden nicht alle in den endgültigen Datenprodukten für die Nutzer:innen bereitgestellt, sondern für interne Kalibrierungs- und Überwachungsprozesse verwendet. **Die Standardkonfiguration des L2A-Produkts zu Beginn der nominalen Phase umfasste 91 (VNIR) und 133 (SWIR) Bänder, also insgesamt 224.**

Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Datenerfassung: weltraumgestützt

Derzeit werden abbildende Spektrometer im Weltraum eingesetzt auf ...
(Mehrfachauswahl)

- frei fliegenden Satellitenplattformen auf sonnensynchronen Umlaufbahnen
- der Internationalen Raumstation (ISS)
- keine der oben genannten Möglichkeiten

Wie lang ist die Gesamtbeobachtungsdauer pro Tag, an dem EnMAP Daten aufzeichnet? (Einfachauswahl)

- 1000 km
- 5000 km
- 30 km
- 500 km

4.5 Datenerfassung: luftgestützt

Seit den frühen 1980er Jahren werden abbildende Spektrometer in Flugzeugen eingesetzt, die in der Regel den VNIR- und oft auch den SWIR-Spektralbereich abdecken. Sie werden bei vielen flugzeuggestützten Einsätzen für die Forschung, für kommerzielle Anwendungen und für Konzeptstudien für weltraumgestützte abbildende Spektrometer verwendet. **Ihre Eigenschaften lassen sich aufgrund der vielfältigen Parametrisierungsmöglichkeiten nicht ohne weiteres vergleichen.**

Für luftgestützte Sensoren sind ähnliche Parameter wie für Satellitensensoren erforderlich, die die Position und die Fluglage des Flugzeugs beschreiben. **Die Fluglage wird durch die drei Drehwinkel der Plattform ausgedrückt: Roll, Pitch und Yaw.** Die **Lage, die Höhe und die Geschwindigkeit über Grund unterliegen jedoch aufgrund von Wind und Turbulenzen wesentlich größeren Schwankungen.** Außerdem verstärken ein viel größeres FOV und die Nähe zum Boden Verzerrungen außerhalb des Nadirs und winkelabhängige Beleuchtungseffekte.

Ein bekanntes Spektrometer, das seit Jahrzehnten auf luftgestützten Plattformen geflogen wird, ist das Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS), das vom NASA JPL in Kalifornien entwickelt und seit Mitte der 1980er Jahre im Auftrag der NASA betrieben wird. Aufbauend auf **AVIRIS wurde das Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer - Next Generation (AVIRIS NG)** entwickelt, um das AVIRIS-Instrument mit einer verbesserten radiometrischen Leistung und einem höheren spektralen Abtastintervall zu ersetzen. Das **folgende Video nimmt uns mit in ein Flugzeug während der AVIRIS-NG Europe 2021 Kampagne**, die in Zusammenarbeit von ESA, NASA/JPL und der Universität Zürich durchgeführt wurde.

VIDEO: Basic-11: Sensor technologies & data acquisition techniques: AVIRIS-NG
(Sensortechnologien und Datenaufnahmetechniken : Aviris-NG)



URL of the video:

<https://www.youtube.com/watch?v=6kBn7FZNBsE>

Während der **AVIRIS-NG Europe 2021 Kampagne** wurden vom **UZH Space Hub der Universität Zürich weitere Videos produziert**. Im folgenden Video spricht Andreas Hüeni über diese große Testflugkampagne, die im Sommer 2021 stattfand.

VIDEO: UZH Space Hub: University of Zürich conducts research flights for NASA and ESA projects from Dübendorf, CH (*UZH Space Hub: Universität Zürich führt von Dübendorf, Schweiz, Forschungsflüge für NASA- und ESA-Projekte durch*)



URL of the video:

<https://www.youtube.com/watch?v=06ughPtdrHg>

Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Datenerfassung: luftgestützt

Was beschreibt die Fluglage? (Einfachauswahl)

- Die Flughöhe des Sensors über dem Meeresspiegel
- Die drei Drehwinkel der Sensorplattform (roll, pitch, and yaw)
- Die Laune des Piloten
- Die durch GPS-Koordinaten erfasste Sensorposition

Die Schwankungen der Fluglage, der Flughöhe und der Geschwindigkeit über Grund sind bei luftgestützten Aufnahmen viel größer als bei weltraumgestützten, hauptsächlich durch ... (Einfachauswahl)

- ... Unterschiede in der Bestrahlungsstärke.
- ... der Einfluss von Wind und Turbulenzen.
- ... ungeschulte Flugzeugpiloten.
- ... Unterschiede in der Konstruktion von luft- und weltraumgestützten Sensoren.

4.6 Datenerfassung: bodengestützt

Datenerfassung: bodengestützt (Feld)

Hyperspektrale luftgestützte Kampagnen sind ziemlich teuer und gehen in der Regel mit einer gleichzeitigen Bodenreferenzdatenkampagne einher. Wenn also Daten aus der Luft gesammelt werden, werden in der Regel auch **Messungen im Feld** mit einem Gerät namens Spektrometer oder Spektroradiometer durchgeführt, das Spektralpunktdaten sammelt. Das Spektrometer ist die Basiseinheit eines Spektroradiometers, das auch eine Eingangsoptik und Kalibrierungen umfasst, die es dem Spektrometer ermöglichen, kalibrierte Messwerte zu erfassen. In der Praxis werden die Begriffe Spektrometer und Spektroradiometer jedoch häufig synonym verwendet. Die mit einem solchen Gerät gesammelten Daten können als Referenz für die atmosphärische Korrektur der luftgestützten Daten verwendet werden, sie werden aber auch oft unabhängig von Befliegungskampagnen erfasst, z. B. um Umweltprozesse in hoher zeitlicher Auflösung zu untersuchen und/oder um Spektralbibliotheken zu erstellen. **Im folgenden Video nehmen Kolleg:innen der LMU München dich mit nach draußen und zeigen dir, wie sie regelmäßige Messungen von landwirtschaftlichen Flächen durchführen.** Das Instrument, das sie verwenden, ist ein [ASD Fieldspec 3 spectroradiometer](#).

VIDEO: Basic-12: Sensor technologies & data acquisition techniques: ASD Field
(Sensortechnologien und Datenaufnahmetechniken: ASD im Gelände)



URL of the video:

<https://www.youtube.com/watch?v=7S1XoN-NifM>

Datenerfassung: bodengestützt (Labor)

Es gibt spezielle Laborspektrometer, aber einige Geräte kann man sowohl im Feld als auch im Labor verwenden. Du hast soeben ein ASD Fieldspec im Feld gesehen - **im folgenden Video wirst du es in einer Laborumgebung sehen können:**

VIDEO: Basic-13: Sensor technologies & data acquisition techniques: ASD Lab
(Sensortechnologien und Datenaufnahmetechniken: ASD im Labor)

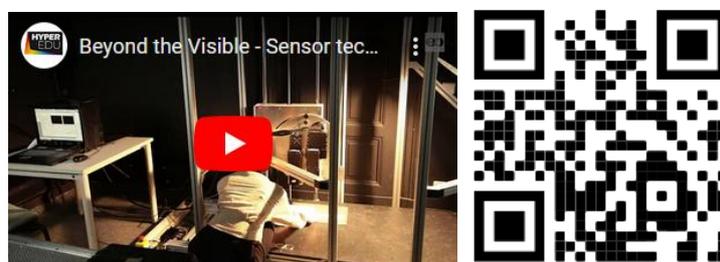


URL of the video:

<https://www.youtube.com/watch?v=Ewhk-rZjOTI>

Aber nicht nur Punktspektrometer wie das ASD Fieldspec werden im Labor eingesetzt - auch Hyperspektralscanner können in Laborumgebungen verwendet werden. In einem früheren Video haben wir dir den AVIRIS-Sensor in der Luft gezeigt. **Im folgenden Video wirst du den HySpex-Sensor im Labor sehen:**

VIDEO: Basic-14: Sensor technologies & data acquisition techniques: HySpex Lab
(Sensortechnologien und Datenaufnahmetechniken: HySpex im Labor)



URL of the video:

https://youtu.be/EaVZ2_McjjY

Und als ob das noch nicht genug wäre ... Neben Befliegungskampagnen und Labormessungen kann **das HySpex-Sensorsystem auch für bodengestützte Hyperspektralstudien im Nahbereich eingesetzt werden**, z.B. für Bergbauanwendungen oder im Bereich der Konservierung und Restaurierung von Kulturgütern. Im Gegensatz zur *translation stage*, die im Labor verwendet wird, sind die Sensoren im Feldaufbau parallel auf einer **rotation stage** montiert, und beide Sensorköpfe drehen das Sichtfeld (FOV) Linie für Linie, wobei die Geschwindigkeit der Rotationsbewegung automatisch an die Integrationszeit der VNIR-Kamera angepasst wird. Die resultierenden 3D-Bildwürfel werden dann radiometrisch kalibriert, co-registriert, in der Größe verändert und zu einem kontinuierlichen Bildwürfel zusammengesetzt. Die Strahldichte-Daten können durch Normalisierung anhand von weißen Referenzplatten, die zuvor in der Szene positioniert wurden, in einen Reflexionsgrad-Datensatz umgewandelt werden. Nach der Vorverarbeitung können die Hyperspektraldaten verwendet werden, um z. B. die Mineralienverteilung an der Oberfläche eines Erzkörpers zu kartieren oder als Grundlage für die Material- und Schadenskartierung von Kulturdenkmälern.



Abbildung 25 HySpex-Sensoren und eine Cubert-Kamera, die auf einer rotation stage (Rotationstisch) montiert sind, um eine Kulturstätte im Nahbereich zu scannen (Marienkirche, Frankfurt/Oder, Deutschland). HySpex Sensor nachgedruckt aus Rogaß et al. (2017) mit Genehmigung von MDPI, Foto der Cubert Kamera mit freundlicher Erlaubnis von Christian Mielke

Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Datenerfassung: bodengestützt

Warum werden Spektraldaten am Boden erfasst? (Mehrfachauswahl)

- Zur Bereitstellung von Referenzdaten während Flugkampagnen
- Zur Untersuchung von Prozessen mit hoher spektraler und zeitlicher Auflösung
- Zur Erstellung von Spektralbibliotheken
- Für Bildungszwecke

4.7 Datenprodukt

Eigenschaften der Daten

Auch wenn dir der Umgang mit Hyperspektraldaten vielleicht völlig fremd war, bist du dir jetzt wahrscheinlich der hohen Komplexität der Daten und den Problemen bei der Auflösung bewusst. Bevor wir uns an die Datenverarbeitung machen, möchte Charly dir im folgenden Video einen **Überblick über die Eigenschaften von Daten der abbildenden Spektroskopie geben:**

VIDEO: Basic-15: Sensor technologies & data acquisition techniques: Data product
(Sensortechnologien und Datenaufnahmetechniken: Datenprodukt)



URL of the video:

https://youtu.be/p4_vWkLtf8w

VIDEO: Sensortechnologien und Datenerfassungstechniken: Datenprodukt

Gain und offset sind über die Zeit konstant

- Richtig
- Falsch

Tote oder schlechte Pixel können nicht korrigiert werden

- Richtig
- Falsch

Ergänze das fehlende Wort

Mit zunehmender spektraler Auflösung wird das vom Sensor verursachte Rauschen (weniger/mehr) sichtbar.

**VIDEO: Sensortechnologien und Datenerfassungstechniken:
Datenprodukt**

**Hast du mitbekommen, welcher Effekt mit spektralen
Unregelmäßigkeiten zusammenhängt?**

- Der sogenannte "Keystone"-Effekt
- Der sogenannte "Smile"-Effekt

Das SNR - ein Maß für die Qualität radiometrischer Daten

Erinnerst du dich? Je höher das Signal-Rausch-Verhältnis ist, desto besser ist die Datenqualität. In der folgenden Grafik kannst du den Effekt interaktiv untersuchen - was passiert mit dem Spektrum, wenn du ein niedrigeres SNR wählst?

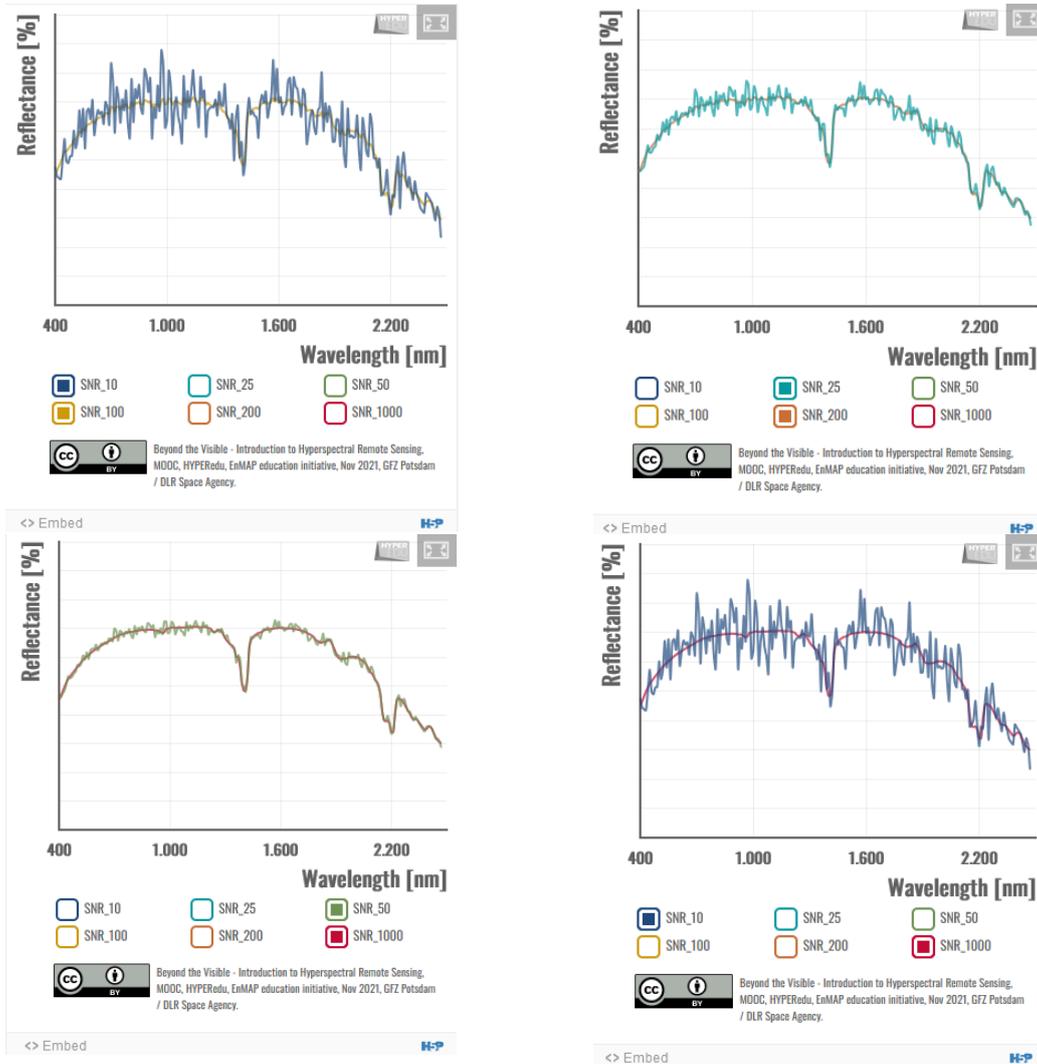
Was meinst du, ab welchem SNR könntest du ein großes Merkmal wie das Doppelmerkmal bei 2.200 nm erkennen?

- Dafür bräuchte man einen sehr hohen SNR von mindestens 200
- Ein niedriger SNR von 25 würde ausreichen



Interaktive Grafik - Signal-Rausch-Verhältnis und Datenqualität

Verfügbar unter diesem [LINK](#).



Interaktive Abbildung 7 **Einfluss des Signal-Rausch-Verhältnis (Signal-to-Noise-Ration, SNR) auf die Datenqualität.** Je geringer das SNR desto größer das Rauschen bzw. geringer die Datenqualität.

Denk daran: Um die interaktive Grafik zu sehen und auszuprobieren, musst du für diesen Kurs eingeschrieben und unter EO College eingeloggt sein!

Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Datenprodukt

Was ist das sogenannte SNR (Signal-Rausch-Verhältnis)? (Einfachauswahl)

- ein Maß für die Qualität der radiometrischen Information
- ein Maß für die Qualität der spektralen Information
- ein Maß für die Qualität der räumlichen Information
- ein Maß für die Qualität der zeitlichen Information

4.8 Ressourcen-Abschnitt: Lektion „Grundlagen der Sensortechnologien und Datenerfassungstechniken“

In diesem Abschnitt haben wir Ressourcen zusammengestellt, die für die Erstellung dieser Lektion verwendet wurden und die wir dir zur weiteren Lektüre empfehlen, da sie viele weitere Details enthalten. Bitte beachte, dass diese Auswahl keinen vollständigen Überblick über alle Ressourcen darstellt - wenn du denkst, dass eine wichtige Ressource fehlt, lass es uns wissen.

Die meisten Abbildungen dieses Vortrags findest du in der [HYPERedu-Foliensammlung](#), die auf EO-College verfügbar ist.

Zitieren als:

A. Brosinsky, M. Brell, S. Livens, K. Segl, T. Kuester, H. Kaufmann, L. Guanter, S. Foerster (2023). **Imaging spectroscopy sensor technologies**, slide collection, HYPERedu, EnMAP education initiative, German Centre for Geosciences GFZ. 2nd revision, originally published 2022.

Quellen und weiterführende Literatur

Thema: Einführung in die Sensortechnologien und das abbildene Spektroradiometer - allgemeine Elemente

- 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., Mühle H., Müller R., Habermeyer M., Ohndorf A., Hill J., Buddenbaum H., Hostert P., Van der Linden S., Leitão P.J., 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(7), 8830-8857. <https://doi.org/10.3390/rs70708830>
- Jensen J.R. (2007): **Remote Sensing of the Environment: An Earth Resource Perspective**. 2nd Edition, Pearson
- Lillesand T., Kiefer R.W., Chipman J. (2008): **Remote Sensing and Image Interpretation**. 6th Edition, Wiley.
- Livens S. (2018): **Comparing Hyperspectral Imaging Concepts Using Key Properties**. Whispers conference, Amsterdam, The Netherlands.

- Rast M., Painter T.H. (2019): **Earth Observation Imaging Spectroscopy for Terrestrial Systems: An Overview of Its History, Techniques, and Applications of Its Missions**. *Surveys in Geophysics*. 40, 303–331. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09517-z>
- Schaeppman M.E. (2009): **Imaging spectrometers**. *SAGE Handbuch Remote Sensing*, 18-166.
- Abbildung 17 von A. Brosinsky, M. Brell, S. Livens, K. Segl, T. Kuester, H. Kaufmann, L. Guanter, S. Foerster (2022). **Imaging spectroscopy sensor technology**. HYPERedu, EnMAP education initiative, German Centre for Geosciences GFZ; originally published March 2022, 2nd revision February 2023.

Thema: Datenerfassung: weltraumgestützt

- Informationen zum EnMAP Sensor sind verfügbar unter www.enmap.org

Thema: Datenerfassung: luftgestützt

- More information about AVIRIS-NG: <https://avirisng.jpl.nasa.gov/aviris-ng.html>
- More information about ARES: <https://ares-observatory.ch/>
- More information about the **AVIRIS-NG Europe 2021 campaign**: Target list and quicklooks of the 2021 campaign: https://ares-observatory.ch/esa_chime_mission_2021/
- For an overview on some typical airborne hyperspectral imaging systems see table 1 in: Taramelli, A., Tornato, A., Magliozzi, M.L., Mariani, S., Valentini, E., Zavagli, M., Costantini, M., Nieke, J., Adams, J., Rast, M. (2020): **An Interaction Methodology to Collect and Assess User-Driven Requirements to Define Potential Opportunities of Future Hyperspectral Imaging Sentinel Mission**. *Remote Sensing*, 12, 1286. <https://doi.org/10.3390/rs12081286>

Wir haben uns auf luftgestützte Systeme in Flugzeugen konzentriert, aber Hyperspektralsensoren werden zunehmend mit Drohnen betrieben. Einige weitere Informationen findest du in:

- Aasen H., Honkavaara E., Lucieer A., Zarco-Tejada P.J. (2018): **Quantitative Remote Sensing at Ultra-High Resolution with UAV Spectroscopy: A Review of Sensor Technology, Measurement Procedures, and Data Correction Workflows**. *Remote Sensing*. 10, 1091. <https://doi.org/10.3390/rs10071091>
- Adão T., Hruška J., Pádua L., Bessa J., Peres E., Morais R., Sousa J.J. (2017): **Hyperspectral Imaging: A Review on UAV-Based Sensors, Data Processing and Applications for Agriculture and Forestry**. *Remote Sensing*. 9, 1110. <https://doi.org/10.3390/rs9111110>
- Manfreda S., McCabe M.F., Miller P.E., Lucas R., Pajuelo Madrigal V., Mallinis G., Ben Dor E., Helman D., Estes L., Ciruolo G., Müllerová J., Tauro F., De Lima M.I., De Lima J.L.M.P., Maltese A., Frances F., Caylor K., Kohv M., Perks M., Ruiz-Pérez G., Su Z., Vico G., Toth B. (2018): **On the Use of Unmanned Aerial Systems for Environmental Monitoring**. *Remote Sensing*. 10, 641. <https://doi.org/10.3390/rs10040641>

- Zhong Y. et al. (2018): **Mini-UAV-Borne Hyperspectral Remote Sensing: From Observation and Processing to Applications**, IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, vol. 6, no. 4, pp. 46-62. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2018.2867592>

Thema: Datenerfassung: bodengestützte Spektrometer

- Goetz, A. F. H. (1975). **Portable field reflectance spectrometer**. JPL Technical Report (pp. 183 – 188). Pasadena, California Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology.
- Wir haben ein **ASD FieldSpec HighRes**® genutzt: <https://www.malvernpanalytical.com/en/products/product-range/asd-range/fieldspec-range/fieldspec-4-standard-res-spectroradiometer>
- Rogaß, C., Körting, F., Mielke, C., Brell, M., Bösche, N., Bade, M., Hohmann, C., (2017). **Translational Imaging Spectroscopy for Proximal Sensing**. -Sensors, 17, 8, 1857

Feldspektroskopie

Unsere Kolleg:innen von der LMU München und andere haben sehr gute Leitfäden zur spektralen Datenaufnahme im Feld veröffentlicht:

- Danner, M.; Locherer, M.; Hank, T.; Richter, K. (2015): **Spectral Sampling with the ASD FieldSpec 4 – Theory, Measurement, Problems, Interpretation**. EnMAP Field Guides Technical Report, GFZ Data Services. <http://doi.org/10.2312/enmap.2015.008>
- Malthus, T.J, Ong, C, Lau, I, Fearn, P, Byrne G and Thankappan, M., Chisholm, L., Suarez, M., Clarke, K., Scarth, P., Phinn, S. (2018) **A community approach to the standardised validation of surface reflectance data. A technical handbook to support the collection of field reflectance data**. Release version 1.0. CSIRO, Australia. ISBN: 978-1-4863-0991-7

Einige Bemerkungen zur Feldspektroskopie:

- Hueni A., Damm A., Kneubler M., Schlapfer D., Schaepman M. E. (2017): **Field and Airborne Spectroscopy Cross Validation – Some Considerations**. IEEE Journal of Selected topics in Applied Earth Observation and Remote Sensing. Vol. 10 No. 3. <http://doi.org/10.1109/JSTARS.2016.2593984>
- Milton E. (1987): **Principles of field spectroscopy**. International Journal of Remote Sensing. 8:12, 1807-1827. <http://dx.doi.org/10.1080/01431168708954818>
- Milton E., Fox N., Schaepman M. (2006): **Progress in Field Spectroscopy**. Computer Science, Economics. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2006.509>

Spektroskopie im Labor:

- Ben-Dor E., Ong C., Lau I.C. (2015): **Reflectance measurements of soils in the laboratory: standards and protocols**. Geoderma. 245–246, 112–124. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.01.002> → *These protocols are currently being further established as ISO as part of the IEEE-SA working group “Standards and protocols for soil spectroscopy” (<https://sagroups.ieee.org/4005/>)*

- Chabrillat S., Gholizadeh A., Neumann C., Berger D., Milewski R., Ogen Y., Ben-Dor E. (2019): **Preparing a soil spectral library using the Internal Soil Standard (ISS) method: Influence of extreme different humidity laboratory conditions.** Geoderma. 355, 113855. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.07.013>
- Kopackova-Strnadova V., Ben-Dor E. (2016): **Normalizing reflectance from different spectrometers and protocols with an internal soil standard.** International Journal of Remote Sensing. 37(6), 1276-1290. <https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1148291>

Einige Hinweise auf Arbeiten, die unsere Kolleg:innen mit dem HySpex-Sensor am Boden durchgeführt haben:

- Atwood E.C., Falcieri F.M., Piehl S., Bochow M., Matthies M., Franke J., Carniel S., Sclavo M., Laforsch C., Siegert F. (2019): **Coastal accumulation of microplastic particles emitted from the Po River, Northern Italy: Comparing remote sensing and hydrodynamic modelling with in situ sample collections.** Marine Pollution Bulletin. Volume 138, Pages 561-574. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.11.045>
- Koerting F., Koellner N., Mielke C., Rogass C., Kuras A., Altenberger U., Kaestner F., Hildebrand C. (2021): **Hyperspectral imaging data of the northern mine face and of laboratory samples of the copper-gold-pyrite mine Apliki, Nicosia District, Republic of Cyprus.** GFZ Data Services. <https://doi.org/10.5880/GFZ.1.4.2021.001>
- Koerting F. (2021): **Hybrid imaging spectroscopy approaches for open pit mining.** Dissertation. University of Potsdam. <https://doi.org/10.25932/publishup-49909>

Finales Quiz: Lektion „Grundlagen der Sensortechnologien und Datenerfassungstechniken“

In diesem finalen Quiz zur Lektion "Grundlagen der Sensortechnologien und Datenerfassungstechniken" haben wir 10 Fragen für dich vorbereitet. **Du musst 50 % der Fragen richtig beantworten, um zur nächsten Lektion zu gelangen.** Du hast eine **unbegrenzte Anzahl von Versuchen, um das Quiz zu bestehen.** Viel Glück!

Erinnerung: Um ein Zertifikat zu erhalten, musst du die Lektionsquizze (3) sowie das finale Quiz in der Online-Version des Kurses bestehen.

Sortiere die Sensoren nach ihrer Pixelgröße von 5 m bis 90 m (höchste räumliche Auflösung ganz oben)

(Optionen: HICO, AVIRIS (airborne), Sentinel-2 (bands 2-4 and 8), CHRIS/PROBA (mode 2-5), EnMAP)

Wähle ein Element

Sortiere die Sensoren nach Plattformen, auf denen sie eingesetzt werden/wurden

(Optionen: "AVIRIS, AIS, HyMAP, APEX, CASI", "DESI, HISUI, EMIT", "EnMAP, PRISMA, CHIME, SBG, Hyperion")

Flugzeug Wähle ein Element

Satellit Wähle ein Element

ISS Wähle ein Element

Welche Pixelgröße hat der hyperspektrale EnMAP-Sensor? (Einfachauswahl)

- 3 m
- 30 m
- 300 m
- 0.3 m

Wie hoch ist die durchschnittliche Höhe der ISS ? (Einfachauswahl)

- 300 km
- 400 km
- 1000 km
- 1400 km

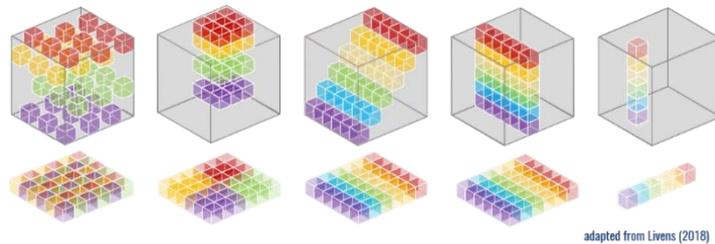
Nenne die drei Winkel der Plattformrotation (Lage), die bei Flugzeugbefliegungen gemessen werden

1.
2.
3.

Was solltest du bei der Erfassung von Spektraldaten am Boden (Feld oder Labor) beachten? (Mehrfachauswahl)

- Messung bei stabilen Beleuchtungsbedingungen
- Vermeidung von hellen/farbigen/reflektierenden Oberflächen in der Nähe
- Wiederholung der weißen Referenzmessungen (und ggf. Optimierung)
- Immer Notizen machen!

Welches der folgenden Diagramme beschreibt ein abbildendes Spektrometer vom Typ "Pushbroom"? (Einfachauswahl)



- 1
- 2
- 3
- 4
- 5

Warum werden Spektraldaten am Boden erfasst? (Einfachauswahl)

- Da einige Gebiete nicht mit dem Flugzeug erreichbar sind
- Da bodengestützte Messungen unabhängig von atmosphärischen Einflüssen sind
- Da bodengestützte Messungen es ermöglichen, Prozesse mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung zu untersuchen
- Weil viele Wissenschaftler:innen in Flugzeugen krank werden und lieber am Boden arbeiten

Leider gibt es einige typische Kompromisse zwischen den Auflösungen. In der Beziehung zwischen räumlicher und spektraler Auflösung gilt: Je höher die eine ist, desto geringer muss die andere sein ... (single-choice)

- ... um die Datengrößen überschaubar zu halten
- ... um die gleiche Anzahl von Photonen auf dem Detektor zu erhalten
- ... um eine akzeptable zeitliche Auflösung zu erreichen
- ... um rechteckige Pixel zu ermöglichen

5 Praktisches Training: Daten und Software

Willkommen zu unserer dritten thematischen Lektion! Wie zuvor erklärt Charly die Lernziele dieser - finalen - Lektion im folgenden Video.

VIDEO: Basic-16: Hands-on training: Lesson Intro (*Praktische Übung: Lektion Intro*)



URL of the video:

<https://youtu.be/Mp9p5E4yw4E>

Bitte beachte, dass die **in dieser Lektion vorgestellten Datenquellen nicht alle potenziellen (kostenlosen) Ressourcen abbilden, sondern eine Auswahl großer und anerkannter Quellen sind sowie einige, die wir selbst zusammengestellt haben.**

Beginnen wir mit dem ersten Thema dieser Lektion.

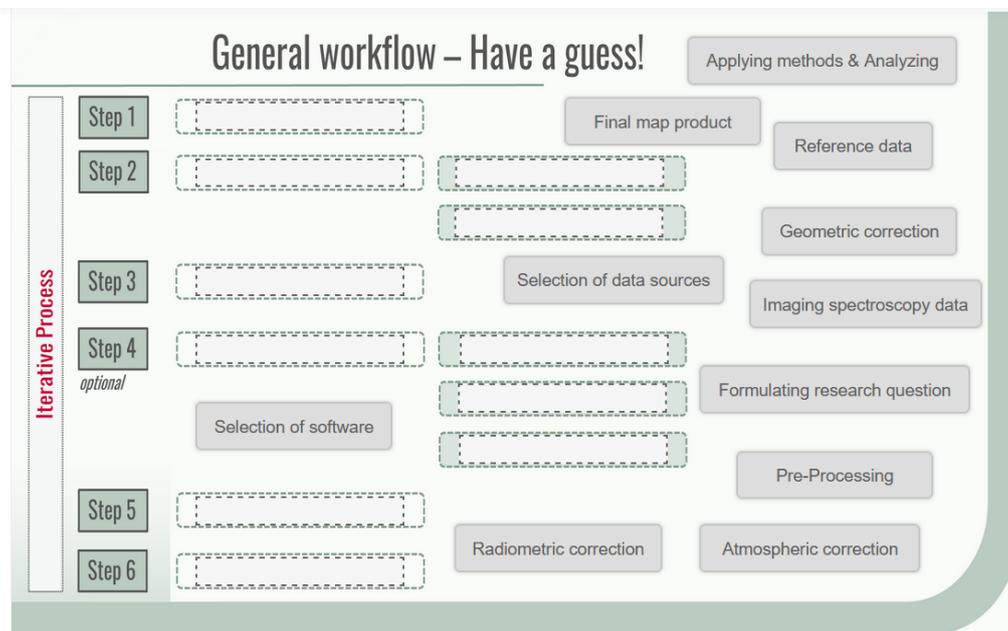
5.1 Von der Forschungsfrage zum Endprodukt

Stell dir vor, du willst deine Forschungsfragen mit Hilfe von Daten aus der abbildenden Spektroskopie beantworten - **wie würde der allgemeine Arbeitsablauf aussehen?** Wir haben eine kleine Übung für dich vorbereitet: Kannst du die 6 verschiedenen Schritte sowie einige konkretere Unterschritte (Schritt 2 und Schritt 4) zuordnen?



Interaktive Grafik – Allgemeiner Workflow

Verfügbar unter diesem [LINK](#).



Interaktive Abbildung 8 **Allgemeiner Arbeitsablauf** (aktuell leider nur auf Englisch verfügbar).

Natürlich ist der gezeigte Arbeitsablauf sehr abstrakt und vereinfacht, und du könntest Situationen erleben, in denen du iterativ zurückgehen und Anpassungen vornehmen musst. Dennoch zeigt diese Übung, dass der Weg zu einem endgültigen, qualitativen Kartenprodukt auf der Grundlage von Daten der abbildenden Spektroskopie viele Schritte umfasst, deren genaue Definition intensives Nachdenken und Überlegen erfordert.

Während die Formulierung der Forschungsfrage dir überlassen bleibt, werden wir in den folgenden Abschnitten dieser Lektion auf die weiteren Schritte näher eingehen. Darunter befinden sich einige sehr nützliche Tipps und erste praktische Erfahrungen. Die Lösung für den allgemeinen Arbeitsablauf findest du [hier](#).

5.2 Datenquellen: weltraumgestützt

Wie du in der vorherigen Lektion gesehen hast, gibt es heute bereits eine Reihe von abbildenden Spektrometern zur Erdbeobachtung im Weltraum. Oft werden diese Daten kostenlos für wissenschaftliche Zwecke zur Verfügung gestellt. In diesem Abschnitt möchten wir dir einige **Datenquellen für die abbildende Spektroskopie aus dem Weltraum vorstellen**.

PRISMA Daten Portal

[PRISMA](#) ist ein von der italienischen Raumfahrtagentur (ASI) finanzierter Erdbeobachtungssatellit mit innovativer elektro-optischer Ausstattung, der einen Hyperspektralsensor mit mehr als 200 Bändern im VNIR- bis SWIR-Bereich mit einer panchromatischen Kamera kombiniert. Der Satellit wurde im März 2019 erfolgreich gestartet. Nutzer:innen können Archivdaten abrufen und neue Datenerfassungen anfordern, sobald sie sich im [PRISMA-Datenportal](#) registriert haben.

Mit der freundlichen Unterstützung von ASI haben wir drei Screencasts für diesen MOOC produziert. Im **ersten Video erhältst du einen kurzen Überblick über die PRISMA-Mission und lernst Schritt für Schritt, wie du dich im PRISMA-Datenportal registrieren kannst**.

VIDEO: Basic-17: Hands-on training: PRISMA User Registration (*Praktische Übung: PRISMA Nutzer:innenregistrierung*)



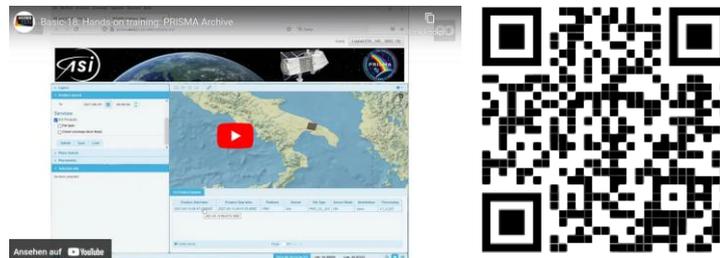
URL of the video:

<https://www.youtube.com/watch?v=7k5Kllgl700&feature=youtu.be>

Das **zweite Video zeigt dir, wie du auf den PRISMA-Datenkatalog zugreifen kannst, um nach archivierten Daten zu suchen**. Du lernst, welche Suchparameter zur Verfügung stehen und wie du Datenprodukte auswählst, bestellst und schließlich herunterlädst. Außerdem wirst du mit EarthBit vertraut gemacht, einer freien und

Open-Source-Software, die zur Visualisierung der Datenprodukte verwendet werden kann.

VIDEO: Basic-18: Hands-on training: PRISMA Archive (*Praktische Übung: PRISMA Archiv*)

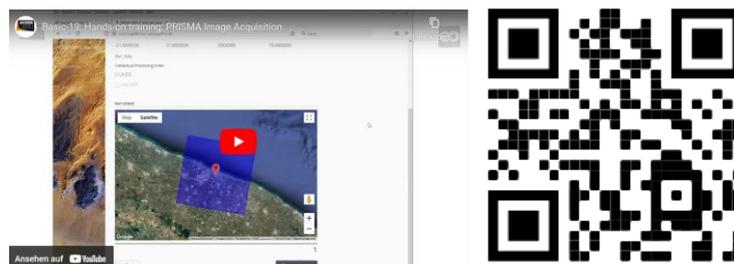


URL of the video:

<https://www.youtube.com/watch?v=7EmP0mCYvq8>

Das **dritte Video zeigt, wie du eine neue PRISMA-Erfassung im PRISMA-Datenportal anfordern kannst**, indem die Parametereinstellungen und Datenprodukte erklärt werden. Danach bist du gut vorbereitet, um Daten für dein eigenes Studiengebiet zu bestellen.

VIDEO: Basic-19: Hands-on training: PRISMA Image Acquisition (*Praktische Übung: PRISMA Datenaufnahme*)



URL of the video:

<https://youtu.be/GjVjW4K3iJs>

EnMAP Datenportal

Das [Data Access Portal](#) umfasst zwei Haupteinstiegspunkte: das *EnMAP Instrument Planning Portal* und das EOWEB® GeoPortal. Im EnMAP-Instrumentenplanungsportal können sich Benutzer:innen registrieren, Vorschläge einreichen und zukünftige Bestellungen planen und anfordern. Das EOWEB® GeoPortal enthält das gesamte EnMAP-Datenarchiv.

Die Nutzer:innen können über zwei verschiedene Optionen auf die EnMAP-Daten zugreifen:

- Nutzer:innen können über das *EnMAP Instrument Planning Portal* Aufnahmen beantragen. Das Portal umfasst das *Proposal Portal* für das Einreichen von Vorschlägen durch wissenschaftliche Nutzer:innen, die auf ein *Announcement of Opportunity (AO)* reagieren, und das *Observation Request Portal*, das die Planung von Beobachtungsanfragen und die Einreichung künftiger Bestellungen unterstützt.
- Über das EOWEB® GeoPortal können Nutzer:innen Daten aus dem Archivkatalog des Deutschen Satellitendatenarchivs (D-SDA) suchen, prozessieren und bestellen.

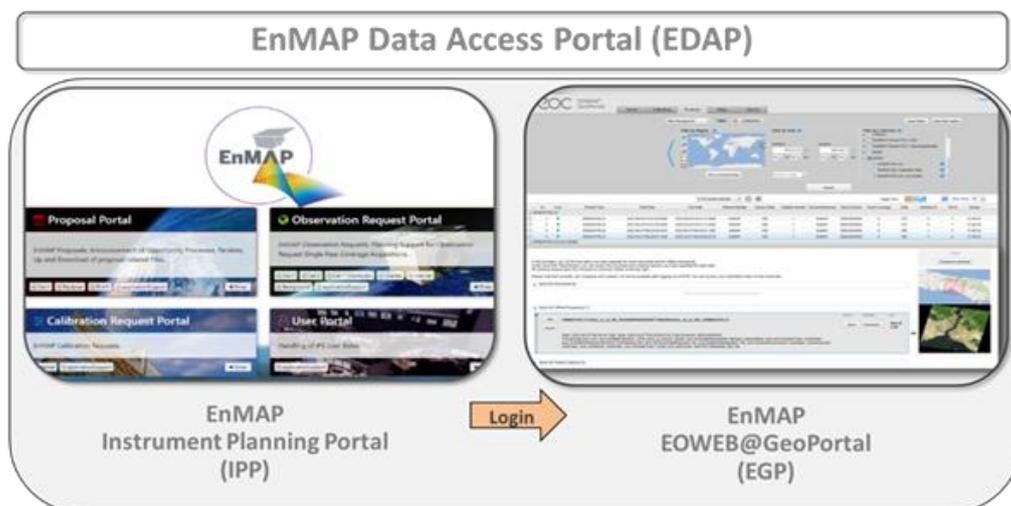


Abbildung 26 EnMAP-Datenportal

USGS Earth Explorer Portal

Das erste abbildende Spektrometer, das im Jahr 2000 ins All geschossen wurde, war das **Hyperion-Spektrometer**, ein Technologiedemonstrator an Bord der NASA-Erdbeobachtungsmission EO-1. Obwohl der Sensor nur für eine einjährige Mission geplant war, war er bis 2017 in Betrieb und die **Daten sind über das [USGS Earth Explorer Portal](#) verfügbar.**

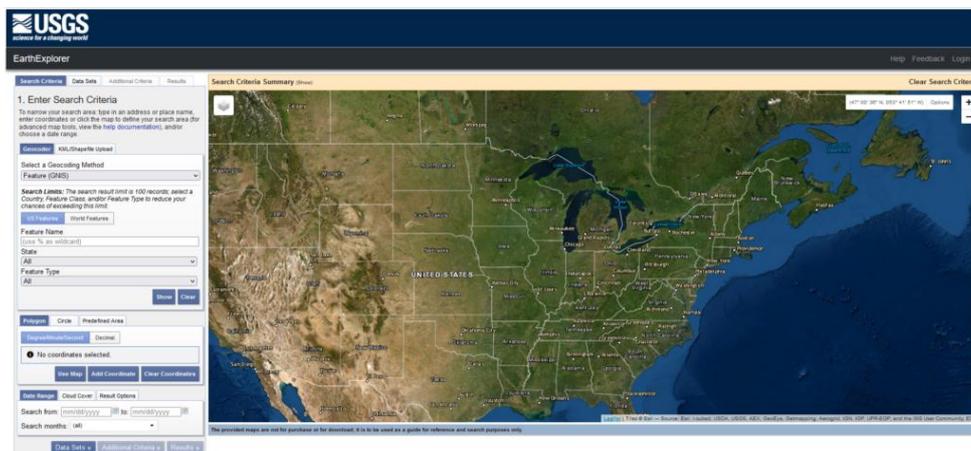


Abbildung 27 USGS Earth Explorer Portal

Dieses Portal bietet Zugang zu einer Reihe von Fernerkundungsdaten und -produkten zusätzlich zu Hyperion, und der USGS stellt einige hilfreiche Anleitungsvideos zur Verfügung (allerdings nicht speziell zum Herunterladen von Hyperion-Daten): Eine EarthExplorer-Einführung, in der die Grundlagen der Nutzung von EarthExplorer erläutert werden, und ein EarthExplorer-Suchkriterium, in dem die verfügbaren Suchoptionen erläutert werden. Sieh dir diese NASA-ARSET-Webinarserie über abbildende Spektroskopie an, die auch eine Anleitung zum Herunterladen von Hyperion-Daten enthält (siehe Abschnitt Ressourcen in dieser Lektion).

Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Datenquellen: weltraumgestützt

Weltraumgestützte abbildende Spektrometerdaten sind derzeit von diesen Sensoren frei verfügbar: (Mehrfachauswahl)

- PRISMA
- EnMAP
- Hyperion
- SBG

5.3 Datenquellen: luftgestützt

Eine weitere Quelle für Daten der abbildenden Spektroskopie sind luftgestützte Flugkampagnen. Diese sind **teuer in der Erstellung** und daher eher **selten**. Oftmals wird dasselbe Gebiet nur selten und wenn überhaupt, dann nur einmal überflogen, und außerdem sind die (Untersuchungs-)Gebiete klein. Die Daten werden jedoch **zunehmend der Nutzer:innengemeinschaft zur Verfügung gestellt**. In diesem Kapitel stellen wir einige Datenportale für luftgestützte Hyperspektraldaten vor.

AVIRIS-NG Daten Portal

In der vorherigen Lektion haben wir etwas über die AVIRIS-NG Europe 2021 Kampagne gelernt. Wie du gelernt hast, ist AVIRIS-NG ein abbildendes Spektrometer, das die reflektierte Strahldichte in 5nm-Intervallen im VNIR-SWIR-Spektralbereich von 380-2500 nm misst. Dieser Sensor wurde bereits in vielen Ländern in luftgestützten Kampagnen geflogen. Das [AVIRIS-NG Data Portal](#) bietet einen **Überblick über die Kampagnendaten** und die Möglichkeit, **L1- und L2-Datenprodukte herunterzuladen**.

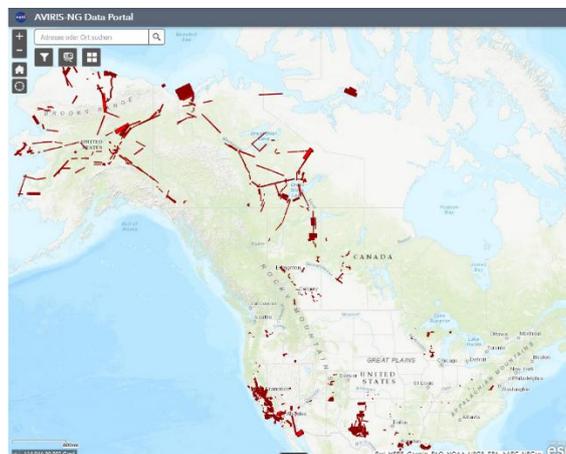


Abbildung 28 Screenshot des AVIRIS-NG Datenportals

Darüber hinaus wurden die Reflexionsdaten der AVIRIS-NG Europe 2021 Kampagne auf der [Kampagnen website von ARES](#), der Airborne Research Facility for the Earth System der Universität Zürich, zum Download bereitgestellt.

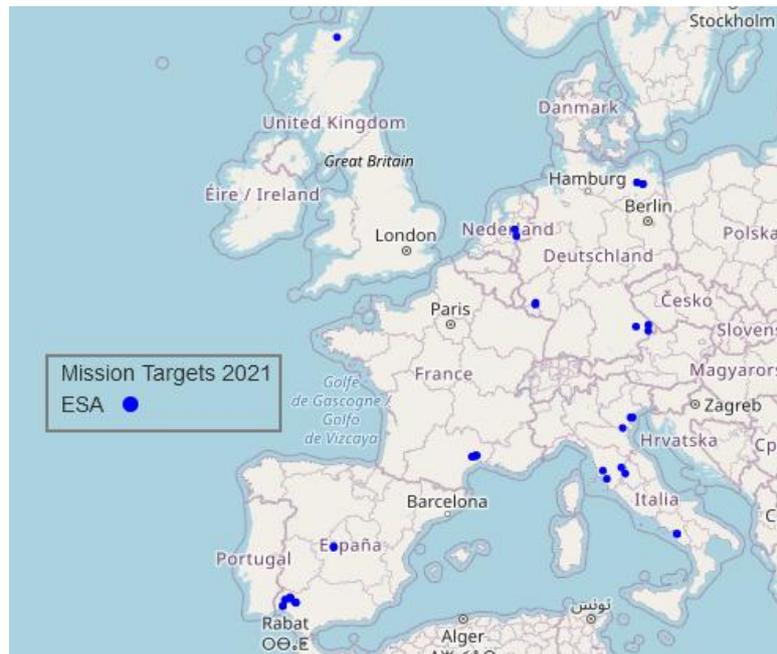
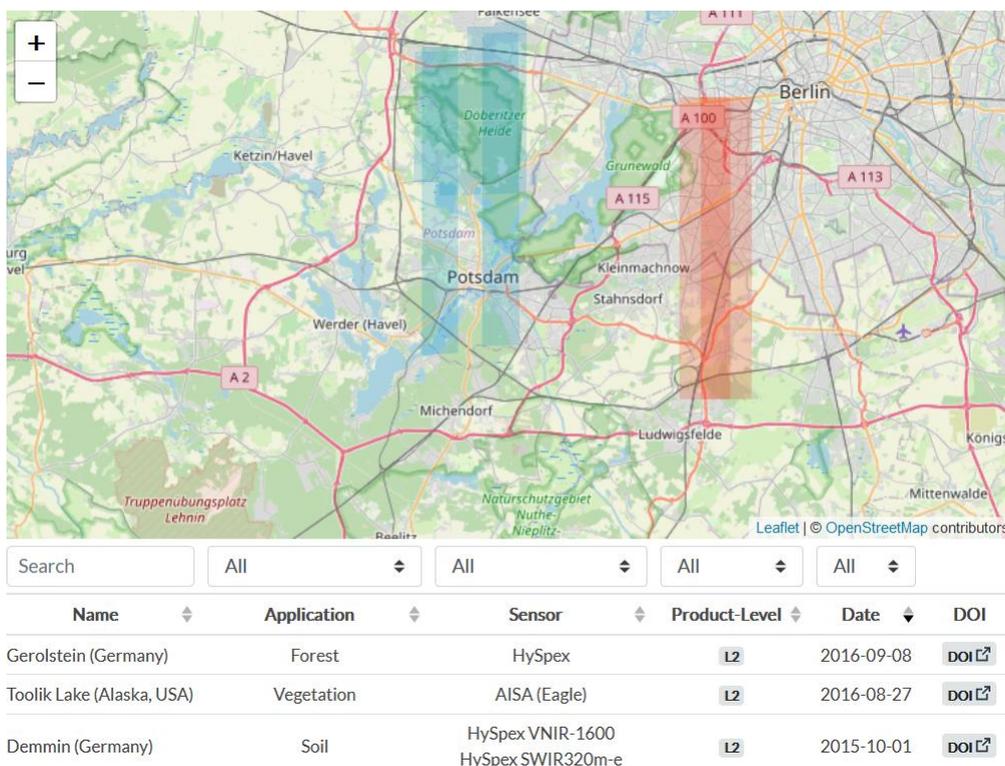


Abbildung 29 ARES AVIRIS-Next Generation Europe 2021 Kampagnen-Website

EnMAP Kampagnen-Portal

Das **EnMAP Kampagnen-Portal** bietet Zugang zu luftgestützten **Hyperspektralbilddatensätzen** sowie zu **simulierten EnMAP-Daten**, die mit dem EnMAP-End-to-End-Simulationstool (EeteS) erzeugt wurden. Darüber hinaus werden **zugehörige In-situ-Daten aus Feld- und Labormessungen bereitgestellt**. Die Flugkampagnen wurden im Rahmen des vorbereitenden Wissenschaftsprogramms der Mission EnMAP durchgeführt, um die Methoden- und Anwendungsentwicklung in der Vorstartphase der EnMAP-Satellitenmission zu unterstützen. Es wurde ein Metadatenportal eingerichtet, das allgemeine Informationen über alle Kampagnen und direkte Links zu den Datensätzen enthält. Die Daten werden der wissenschaftlichen Gemeinschaft unter einer Creative-Commons-Lizenz über die GFZ-Datendienste frei zur Verfügung gestellt.



Name	Application	Sensor	Product-Level	Date	DOI
Gerolstein (Germany)	Forest	HySpex	L2	2016-09-08	DOI
Toolik Lake (Alaska, USA)	Vegetation	AISA (Eagle)	L2	2016-08-27	DOI
Demmin (Germany)	Soil	HySpex VNIR-1600 HySpex SWIR320m-e	L2	2015-10-01	DOI

Abbildung 30 Screenshot des EnMAP Kampagnen-Portals

Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Datenquellen: luftgestützt

Hast du dir die Portale angeschaut? Welches bietet Luftbilddaten UND entsprechende Bodenreferenzdaten zum direkten Download an? Hinweis: Bei den anderen Portalen sind die Bodenreferenzdaten oft auf Anfrage bei den für die jeweilige Kampagne genannten Ansprechpartner:innen erhältlich.

(Einfachauswahl)

- EnMAP Kampagnen-Portal
- AVIRIS Portal
- ARES Portal

5.4 Datenquellen: Spektralbibliotheken

Wie in der vorherigen Lektion dargestellt, werden Hyperspektraldaten nicht nur als Bildwürfel, sondern auch als **Punktmessungen** erfasst, z. B. **durch Feld- und/oder Laborspektroskopie**. Manchmal werden diese Messungen der Öffentlichkeit in Form von Spektralbibliotheken zur Verfügung gestellt, die die Materialidentifizierung und -kartierung in der Labor- und Feldspektroskopie und Fernerkundung erleichtern. Im Folgenden **stellen wir eine Reihe von frei zugänglichen Spektralbibliotheken vor, die verschiedene Oberflächenmaterialien enthalten**. Spektralbibliotheken, die auf Daten von abbildenden Spektrometern und unbehandelten Proben basieren, sind noch nicht in großer Zahl frei verfügbar.

USGS Spektralbibliothek

Eine weithin bekannte, frei verfügbare, akkreditierte Bibliothek wird vom USGS zur Verfügung gestellt. In der USGS Spectral Library Version 7 sind **Reflexionsspektren von Mineralien, Mineralgemischen, Gesteinsbeschichtungen, Flüssigkeiten, gefrorenen flüchtigen Stoffen, organischen Verbindungen, künstlichen Materialien, Vegetation und anderen biologischen Materialien** zusammengestellt. Den Spektren sind detaillierte Probenbeschreibungen beigelegt, einschließlich der Ergebnisse von Röntgenbeugung, Elektronenstrahl-Mikroanalyse und anderen Analysemethoden. Auf der Grundlage dieser Referenzspektren können z. B. geologische Oberflächen mittels Bildklassifikation kartiert werden. Da die Spektraldaten der Bibliothek in der Regel von Punktspektralradiometern, z. B. dem Analytical Spectral Devices (ASD) FieldSpec® 3, erfasst werden, ist es notwendig, sie spektral an die Eigenschaften des Sensors anzupassen, mit dem das zu analysierende Bild aufgenommen wurde.

ECOSTRESS Spektralbibliothek

Die [ECOSTRESS Spektralbibliothek](#) wurde im Rahmen der Projekte ASTER und ECOSTRESS entwickelt und im Februar 2018 (Version 1.0) veröffentlicht. Sie **umfasst eine Zusammenstellung von über 3400 Spektren natürlicher und künstlicher Materialien** und enthält über 1100 neue Spektren von Vegetation und nichtphotosynthetischer Vegetation sowie Daten aus drei anderen Spektralbibliotheken: Der Johns Hopkins University (JHU), des Jet Propulsion Laboratory (JPL) und des United States Geological Survey (USGS - Reston).

LUCAS SOIL Spektralbibliothek

Der **Land Use/Cover Area frame statistical Survey Soil (LUCAS SOIL)** ist eine **umfassende und regelmäßige Oberboden-erhebung, die in der gesamten Europäischen Union durchgeführt wird**, um politisch relevante Statistiken über die Auswirkungen der Landwirtschaft auf die Bodeneigenschaften zu erstellen (Orgiazzi et al. 2018). **LUCAS SOIL** stellt derzeit den **größten harmonisierten, frei zugänglichen Datensatz von Oberbodeneigenschaften** dar, der auf kontinentaler Ebene verfügbar ist.

In den **LUCAS SOIL**-Erhebungen 2009/2012 und 2015 wurde eine Reihe von physikalisch-chemischen Bodeneigenschaften systematisch und standardisiert gemessen, darunter pH-Wert, organischer Kohlenstoff, Nährstoffkonzentrationen und Kationenaustauschkapazität und weitere auf der Grundlage von mehr als 40.000 gesammelten Oberbodenproben. Zusätzlich zu den genannten physikochemischen Eigenschaften wurden die diffusen **Reflexionspektren** der Proben im Spektralbereich von 400 bis 2500 nm mit einer spektralen Auflösung von 2 nm bestimmt. Einzelheiten zur Methodik der Spektralmessungen sind in Nocita et al. (2014) beschrieben sowie in mehreren Studien, die auf der **LUCAS SOIL-Spektralbibliothek** basieren.

Die LUCAS-SOIL-Daten sind nach Registrierung auf der [Website des Europäischen Boden-Datenzentrums](#) frei verfügbar.

SPECCHIO Spektrales Informationssystem

SPECCHIO ist ein **spektrales Informationssystem zur Speicherung von Referenzspektren und Spektralkampagnendaten, die mit Spektroradiometern gewonnen wurden**. Die Einbeziehung eines umfangreichen Metadatensatzes in das Datenmodell gewährleistet die Langlebigkeit der Spektraldaten und ermöglicht die gemeinsame Nutzung von Spektraldaten durch verschiedene Forschungsgruppen. Das Informationssystem wurde an der Universität Zürich über einen Zeitraum von fast 20 Jahren entwickelt und ist in der Community weit verbreitet. Die neueste Version 3 wird in einem Übersichtspapier von Hueni et al. (2020) ausführlich beschrieben.

Open Soil Spektral Bibliothek

Das koordinierte Innovationsnetzwerk SoilSpec4GG (Soil Spectroscopy for the Global Good) gab am 5. Dezember 2021 (übrigens der Weltbodentag) die Veröffentlichung der **Open Soil Spectral Library (OSSL)** bekannt, die [hier](#) öffentlich zugänglich ist. SoilSpec4GG ist ein vom USDA finanziertes Innovationsnetzwerk, welches Bodenwissenschaftler:innen, Spektroskopiker:innen, Informatiker:innen, Datenwissenschaftler:innen und Softwareingenieur:innen zusammenbringen will, um einige der derzeitigen Engpässe zu überwinden, die eine breitere und effizientere Nutzung der Bodenspektroskopie verhindern.

Bitte **beachte**, dass die **Liste der Datenquellen sicherlich nicht vollständig ist und nur frei verfügbare Daten enthält**. Daten aus weiteren Sammlungen, wie z.B. der **brasilianischen Bodenspektralbibliothek ([BSSL](#))** oder der Spektralbibliothek **[SPECTION](#) - SPECTral database for vegeTATION** können auf Antrag für dich zugänglich gemacht werden.

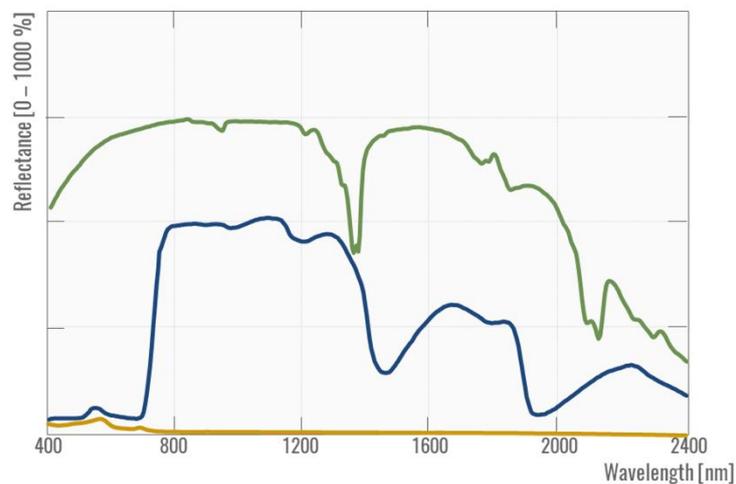
Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Datenquellen: Spektralbibliotheken

Jetzt haben wir eine kleine Ratefrage für dich (Du kannst auch in den angegebenen Quellen suchen): **Wie viele Basisspektren sind in der USGS Spectral Library Version 7 zum Download verfügbar?** (Einfachauswahl)

- weniger als 100
- 100 – 1000
- 1000 – 2000
- mehr als 2000

Der Graph zeigt Spektren von drei verschiedenen Oberflächenmaterialien - kannst du sie identifizieren?



Grün ist ... [Wähle ein Element](#)

Blau ist ... [Wähle ein Element](#)

Gelb ist ... [Wähle ein Element](#)

5.5 Vorverarbeitung der Daten

Jetzt, wo du weißt, wo du Daten erhältst, kannst du mit deinen Analysen beginnen, richtig? Nun, fast! Wie wir am Ende der vorherigen Lektion gelernt haben, sind Hyperspektraldaten ziemlich komplex und es gibt einige Dinge zu beachten. Die meisten der oben vorgestellten Datenportale bieten Daten in verschiedenen Verarbeitungsstufen an, einschließlich vorverarbeiteter, gebrauchsfertiger Level-2-Reflexionsdaten. Wenn die Vorverarbeitung noch nicht abgeschlossen ist oder du mit der Datenqualität der vorverarbeiteten Daten nicht zufrieden bist, kannst du die Korrekturschritte selbst durchführen. Charly erläutert **im nächsten Video einige Aspekte, die bei der Datenauswahl und -vorverarbeitung zu beachten sind:**

VIDEO: Basic-20: Hands-on training: Data preprocessing (*Praktische Übung: Datenvorverarbeitung*)



URL of the video:

<https://www.youtube.com/watch?v=drqFyMmyPI0>

VIDEO: Praktisches Training: Vorverarbeitung der Daten

Wofür steht TOA?

- Totale Absorption
- Top of Atmosphere
- Totale optische Aktivität

Die Auswirkung der geometrischen Korrektur ist in der Regel deutlicher in ...

- Luftgestützten Daten
- Weltraumgestützten Daten

Wenn ich Daten vergleichen möchte, die von verschiedenen Sensoren, aber zum gleichen Zeitpunkt und am gleichen Ort erfasst wurden, muss ich eine atmosphärische Korrektur vornehmen!

- Richtig
- Falsch

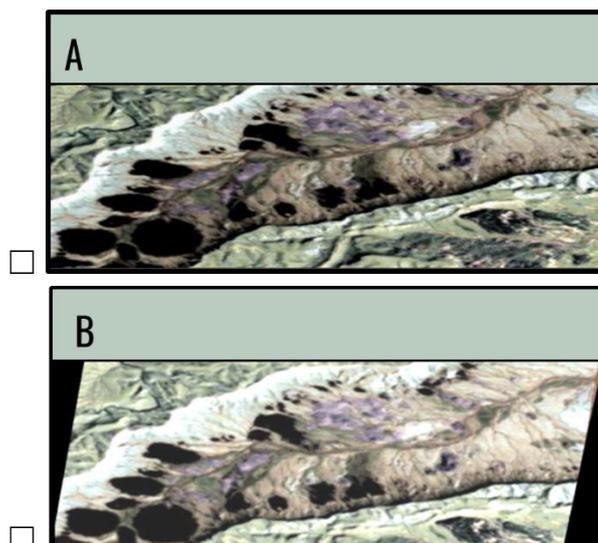
Bitte absolviere das folgende Quiz, um zum nächsten Thema zu gelangen.

Quiz: Vorverarbeitung der Daten

Welche Vorverarbeitungsschritte sollten bei Hyperspektraldaten durchgeführt werden? (Mehrfachauswahl)

- Radiometrische Korrektur
- Kosmische Korrektur
- Atmosphärische Korrektur
- Geometrische Korrektur

Bei der geometrischen Korrektur werden unregelmäßig verteilte Messungen, die in der Sensorgeometrie erfasst wurden, in regelmäßig verteilte Pixel in einer Kartenprojektion umgewandelt. Welche der beiden folgenden Szenen wurde geometrisch korrigiert: (Einfachauswahl)



Fülle die Lücken (Optionen: spektrale Ungleichmäßigkeiten, räumliche Ungleichmäßigkeiten, radiometrische Ungleichmäßigkeiten, zeitliche Ungleichmäßigkeiten, radiometrische Korrektur, geometrische Korrektur, atmosphärische Korrektur)

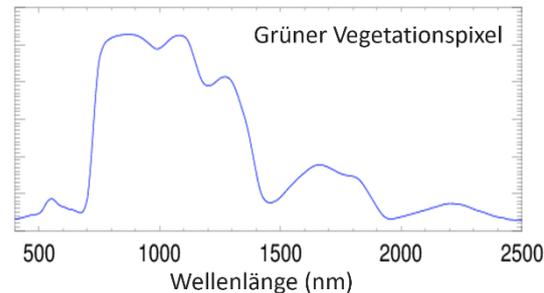
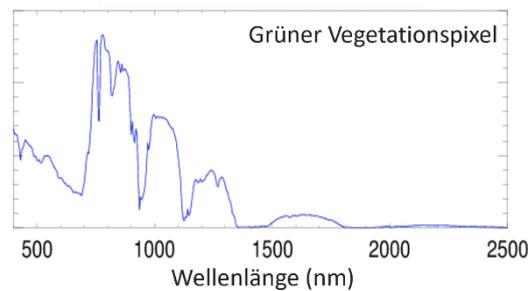
Der Keystone-Effekt ist eine , die bei der berücksichtigt werden muss.

Was wird bei der atmosphärischen Korrektur berücksichtigt?

(Mehrfachauswahl)

- Sonnenstand
- Keystone Ausgleich
- Atmosphärischer Zustand
- Gelände

Die beiden folgenden Spektren zeigen ein Vegetationsspektrum vor und nach Anwendung der atmosphärischen Korrektur. Wähle das Spektrum ohne Atmosphärenkorrektur? (Einfachauswahl)



Warum ist die atmosphärische Korrektur wichtig? (Mehrfachauswahl)

- Weil sie digitale Zahlen in atmosphärische Strahlung umwandelt
- Weil sie die Oberflächenreflexion in digitale Zahlen umwandelt
- Weil durch sie die Oberflächenreflexion errechnet wird, die den Fingerabdruck der Oberflächenmaterialien liefert
- Weil durch sie die Oberflächenreflexion errechnet wird, die zwischen Szenen übertragbar ist, die zu unterschiedlichen Zeitpunkten oder an unterschiedlichen Orten aufgenommen wurden

5.6 Methoden und Software

Nun bist du bereit für die eigentliche Analyse deiner Daten. Es gibt **eine Vielzahl von Methoden**, um den hohen Informationsgehalt abbildender Spektroskopiedaten zu analysieren. Diese Methoden können auf unterschiedliche Weise strukturiert sein. Im folgenden Video gibt Charly einen **Überblick über weit verbreitete Methoden** und unterteilt sie in Methoden, die sich **zur Klassifizierung eignen**, und Methoden, die sich **für die Quantifizierung eignen**. Außerdem gibt er einen kurzen Überblick über Software, die man für die Datenanalyse verwenden kann.

VIDEO: Basic-21: Hands-on training: Methods & software (*Praktische Übung: Methoden und Software*)



URL of the video: https://www.youtube.com/watch?v=D-cXsw_A6r0

VIDEO: Praktisches Training: Methoden & Software

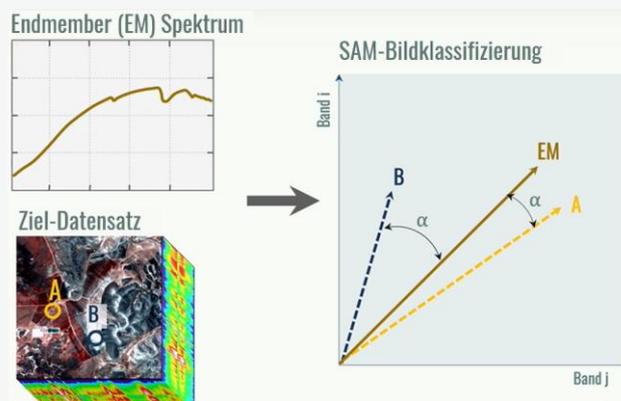
Bevor wir uns einige Verarbeitungstechniken ansehen, weißt du schon, was ein so genanntes "Endmember" ist, das in einigen der Techniken verwendet wird? Keine Sorge, auf den nächsten Folien erfährst du mehr über Endmember. Ein spektrales Endmember in der Fernerkundung ist...

- ... ein unbekanntes Ziel oder Spektrum
- ... ein Ziel oder ein Spektrum von sehr hoher Reinheit

VIDEO: Praktisches Training: Methoden & Software

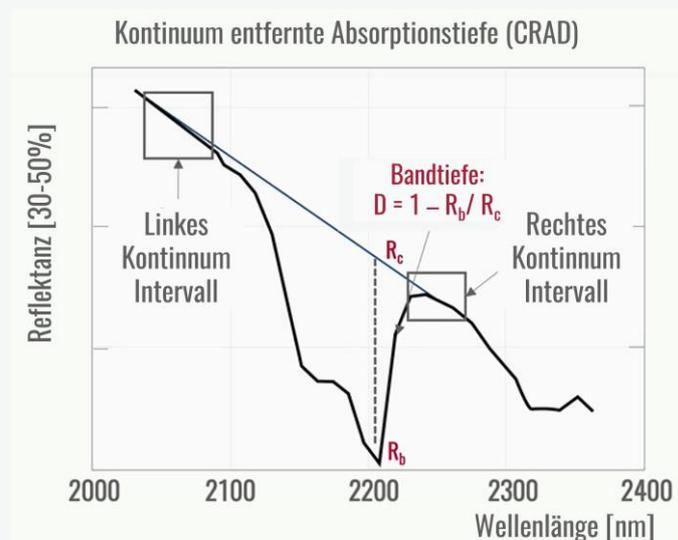
Welches Ziel ist dem Spektrum des Endmembers auf der Grundlage der Banden i und j spektral am ähnlichsten?

- A
- B



Erinnerst du dich, dass du diese Funktion schon einmal gesehen hast ... Erinnerst du dich auch an das entsprechende Mineral?

- Calcit
- Gips
- Kaolinit



VIDEO: Praktisches Training: Methoden & Software

Ordne die vorgestellten Methoden den allgemeinen Gruppen zu.

(Optionen: Spectral Angle Mapper (SAM), Spectral Mixing Analyses (SMA), Spectral Feature Analyses (SFA), Radiative Transfer Modelling (RTM), Spectral Feature Fitting (SFF), Support Vector Machine (SVM) Classification)

Klassifizierungs Methode	Spectral Mixing Analysis (SMA)
Wähle ein Element	Wähle ein Element
Wähle ein Element	Wähle ein Element
Wähle ein Element	Wähle ein Element

Charly erwähnte gerade eine Technik namens **"continuum removal"** (dt. Kontinuumsentfernung) - hast du eine Idee, was das ist? Ja? Okay, dann geh einfach zum nächsten Thema. Nein? Nun, das "Kontinuum" ist einfach eine konvexe Hülle, die für (a) das gesamte Spektrum oder (b) einen bestimmten Absorptionsbereich (oder ein Merkmal) berechnet werden kann (siehe Abbildung 32 unten). Die Entfernung des Kontinuums führt zu einer Normalisierung der Spektren und ermöglicht den Vergleich der Absorptionstiefen ausgehend von einer gemeinsamen Basislinie (die gleich 1 ist).

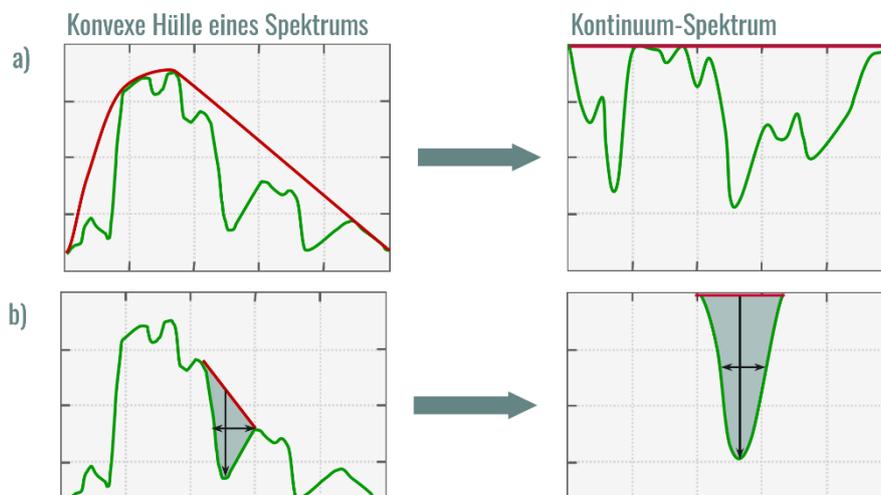


Abbildung 31 Schematische Darstellung des Konzepts der Kontinuumsentfernung (a) das gesamte Spektrum und (b) einen bestimmten Absorptionsbereich mit freundlicher Erlaubnis von Theres Kuester

Quiz: Methoden & Software

Ordne die vorgestellten Methoden den allgemeinen Gruppen "Klassifizierungsmethoden" oder "Quantifizierungsmethoden" zu (Fülle die Lücken)

Optionen: Klassifizierung (3x), Quantifizierung (3x)

Spectral Angle Mapper (SAM): Wähle ein Element Methode

Spectral Feature Fitting (SFF): Wähle ein Element Methode

Spectral Mixing Analysis (SMA): Wähle ein Element Methode

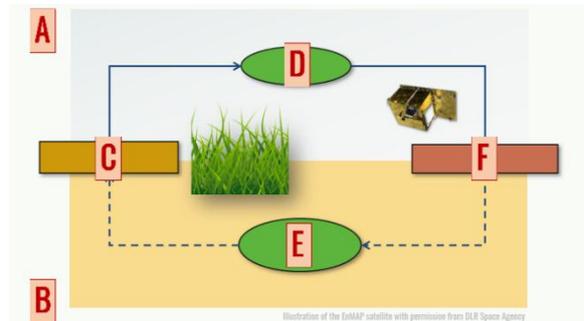
Spectral Feature Analysis (SFA): Wähle ein Element Methode

Support Vector Machine (SVM) classification: Wähle ein Element Methode

Radiative Transfer Modelling (RTM): Wähle ein Element Methode

Kannst du die richtigen Begriffe zuordnen? (Optionen: Inverser Modus, Vorwärtsmodus, Inversions-Algorithmus, Vegetationseigenschaften, Reflexionsdaten, RTM)

- A Wähle ein Element
- B Wähle ein Element
- C Wähle ein Element
- D Wähle ein Element
- E Wähle ein Element
- D Wähle ein Element



5.7 Einführung in die EnMAP-Box

Es gibt verschiedene Softwareoptionen, die eine Visualisierung und Analyse von Hyperspektraldaten ermöglichen. Eine dieser Optionen ist die [EnMAP-Box](#), ein **kostenloses und Open Source Python-Plug-In** für [QGIS](#), das speziell für die **Verarbeitung und Visualisierung von Daten der abbildenden Spektroskopie**, wie z.B. der EnMAP-Mission, aber auch für andere optische Fernerkundungsdaten entwickelt wurde. Die EnMAP-Box wurde im Rahmen des vorbereitenden Wissenschaftsprogramms der Mission EnMAP entwickelt, um eine fortgeschrittene Verarbeitung von hochdimensionalen spektralen Fernerkundungsdaten und eine verbesserte Visualisierung und Analyse von multispektralen Fernerkundungsdaten und Spektralbibliotheken in einer GIS-Umgebung zu ermöglichen. Das Plug-In besteht aus einer grafischen Benutzeroberfläche für die Datenvisualisierung und die Verwaltung von Spektralbibliotheken, einer Reihe fortgeschrittener allgemeiner und anwendungsorientierter Algorithmen und einer hochentwickelten Programmierschnittstelle (EnMAP API). Die EnMAP-Box kann in QGIS oder eigenständig gestartet werden und ist im QGIS Plug-In Repository registriert.

Um dir einen **ersten Einblick in die Arbeit mit der EnMAP-Box zu geben**, haben wir die **folgenden drei Screencasts für dich produziert**. Der erste Screencast erklärt die **Installation der EnMAP-Box Software**, der zweite die **verschiedenen Visualisierungstools** und der dritte schließlich die **verschiedenen Möglichkeiten für die Arbeit mit Spektralbibliotheken**. Ausführliche und aktuelle Informationen zur EnMAP-Box findest du auf der [Dokumentations-Website](#), wo du auch ein Benutzerhandbuch sowie verschiedene Anwendungs-Tutorials findest.

Die Installation der EnMAP-Box und die aktive Teilnahme an einem der Tutorien sind nicht zwingend erforderlich, um diesen MOOC zu bestehen. Wir möchten dich jedoch ermutigen, diese Gelegenheit zu nutzen, um bei einigen von Expert:innen geleiteten praktischen Übungen eigene Erfahrungen zu sammeln! Bitte informiere dich auf der [EnMAP-Box website](#) über die **aktuellste unterstützte QGIS-Version**.

Installation

VIDEO: Basic-22: Hands-on training: EnMAP-Box Installation (*Praktische Übung: EnMAP-Box Installation*)



URL of the video:

https://www.youtube.com/watch?v=_SNbLmB8aCQ

Datenvisualisierung

VIDEO: Basic-23: Hands-on training: EnMAP-Box Intro (*Praktische Übung: EnMAP-Box Intro*)



URL of the video:

<https://youtu.be/31FQ5zXl2Rw>

Arbeiten mit Spektralbibliotheken

VIDEO: Basic-24: Hands-on training: EnMAP-Box Spectral Library (*Praktische Übung: EnMAP-Box Spektralbibliothek*)



URL of the video:

<https://youtu.be/qVoi0Cjhel>

5.8 Ressourcen-Abschnitt: Lektion „Praktisches Training : Daten & Software“

In diesem Abschnitt haben wir Ressourcen zusammengestellt, die für die Erstellung dieser Lektion verwendet wurden und die wir dir zur weiteren Lektüre empfehlen, da sie viele weitere Details enthalten. Bitte beachte, dass diese Auswahl keinen vollständigen Überblick über alle Ressourcen darstellt - wenn du denkst, dass eine wichtige Ressource fehlt, lass es uns wissen.

Viele Abbildungen dieses Kurses befinden sich in HYPERedu-Foliensammlungen, die auf EO-College verfügbar ist.

Zitieren als:

K. Berger, C. Atzberger, M. Danner, M. Wocher, T. Kuester, S. Foerster (2020). [Dimensionality reduction of imaging spectroscopy data](#), HYPERedu, EnMAP education initiative, March 2020, LMU Munich.

K. Berger, J. Verrelst, C. Atzberger, M. Weiss, S. Steinhauser, M. Wocher, S. Foerster, T. Kuester (2020). [Retrieval approaches of vegetation traits from imaging spectroscopy data](#), HYPERedu, EnMAP education initiative, September 2020, LMU Munich.

Quellen und weiterführende Literatur

Thema: Datenquellen: weltraumgestützt

PRISMA DATEN

- <http://prisma-i.it>
- <https://prisma.asi.it>

EnMAP Daten

- www.enmap.org
- <https://eoweb.dlr.de>

USGS Earth Explorer Portal (Hyperion)

- <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- An EarthExplorer Introduction discussing the basics of using EarthExplorer (by USGS): <https://www.youtube.com/watch?v=eAmTxsg6ZYE>
- An EarthExplorer Search Criteria discussing the available search options (by USGS): <https://www.youtube.com/watch?v=CVsgjp9jRyA>

- A tutorial on Hyperion (by NASA ARSET, 29:53 -37:30): <https://www.youtube.com/watch?v=x7l6n7njVPo>
- A recent webinar series on imaging spectroscopy (by NASA ARSET): <https://appliedsciences.nasa.gov/join-mission/training/english/arset-hyperspectral-data-land-and-coastal-systems>

Thema: Datenquellen: luftgestützt

AVIRIS-NG

- Overview of campaign data and download possibility for L1 and L2 data products: <https://avirisng.jpl.nasa.gov/dataportal/>
- Data of the *ESA CHIME & SBG AVIRIS-Next Generation Europe 2021 campaign* available for download from https://ares-observatory.ch/esa_chime_mission_2021/

EnMAP Flugkampagnen Daten

- EnMAP data simulated from airborne data (https://www.enmap.org/data_tools/simulated/)
- Overview of campaign data direct links to the dataset landing pages: https://www.enmap.org/data_tools/flights or, alternatively, search and data download via https://dataservices.gfz-potsdam.de/portal/?q=hyperspectral*

Thema: Datenquellen: Spektralbibliotheken

LUCAS

- LUCAS SOIL data available via the European Soil Data Centre website <https://esdac.jrc.ec.europa.eu/resource-type/soil-point-data>
- Orgiazzi, A.; Ballabio, C.; Panagos, P.; Jones, A.; Fernández-Ugalde, O. (2018): **Lucas soil, the largest expandable soil dataset for Europe: A review.** *Eur. J. Soil Sci.* 69, 140–153.

Einige Studien, die LUCAS nutzen:

- Castaldi F., Chabrilat S., Chartin C., Genot V., Jones A., van Wesemael B. (2018): **Estimation of soil organic carbon in arable soil in Belgium and Luxembourg with the LUCAS topsoil database.** *Eur. J. Soil Sci.* 2018, 69, 592–603. <https://doi.org/10.1111/ejss.12553>
- Nocita M., Stevens A., Tóth G., Panagos P., van Wesemael, B., Montanarella L. (2014): **Prediction of soil organic carbon content by diffuse reflectance spectroscopy using a local partial least square regression approach.** *Soil Biology & Biochemistry.* 68,337–347. <https://doi.org/10.1016/j.SOILBIO.2013.10.022>
- Ward K.J., Chabrilat S., Brell M., Castaldi F., Spengler D., Foerster S. (2020): **Mapping Soil Organic Carbon for Airborne and Simulated EnMAP Imagery Using the LUCAS Soil Database and a Local PLSR.** *Remote Sensing.* 12, 3451. <https://doi.org/10.3390/rs12203451>
- Ward K.J., Chabrilat S., Neumann C., Foerster S. (2019): **A remote sensing adapted approach for soil organic carbon prediction based on the spectrally clustered LUCAS soil database.** *Geoderma.* 353, 297–307. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.07.010>

USGS Spektralbibliothek

- USGS Spectral Library Version 7 <https://crustal.usgs.gov/speclab/QueryAll07a.php>

ECOSTRESS Spektralbibliothek

- <https://ecostress.jpl.nasa.gov/>
- Meerdink S. K., Hook S. J., Roberts D. A., Abbott E. A. (2019): **The ECOSTRESS spectral library version 1.0.** Remote Sensing of Environment. 230(111196), 1–8. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.015>

SPECCHIO Spektrales Informationssystem

- <https://specchio.ch/>
- Hueni A., Chisholm L., Ong, C., Malthus T., Wyatt, M., Trim S., A., Schaepman M. E., Thankappan M. (2020): **The SPECCHIO Spectral Information System.** IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. 13: 5789-5799. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2020.3025117>

Open Soil Spektralbibliothek

- <https://soilspectroscopy.org/>
- <https://explorer.soilspectroscopy.org/>

Brazilian Soil Spektralbibliothek

- <https://bibliotecaespectral.wixsite.com/english>

SPECTATION

- <http://www-app2.gfz-potsdam.de/spectation/?file=main>

Thema: Daten-Vorverarbeitung

Vorverarbeitung von luftgestützten Daten

- Atmospheric / Topographic Correction for Airborne Imagery (ATCOR-4 User Guide, Version 7.4.0, September 2021)
- Muller R., Lehner M., Muller R., Reinartz P., Schroeder M., Vollmer B. (2002): **A program for direct georeferencing of airborne and spaceborne line scanner images.** International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences. 34, 148–153.
- Richter R., Schläpfer D. (2002): **Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 2: atmospheric/topographic correction.** International Journal of Remote Sensing. 23, 2631–2649. <https://doi.org/10.1080/01431160110115834>
- Schläpfer D., Richter R. (2002): **Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 1: Parametric orthorectification.** International Journal of Remote Sensing. 23, 2609–2630. <https://doi.org/10.1080/01431160110115825>

- Thompson D.R., Guanter L., Berk A., Gao B.-C., Richter R., Schläpfer D., Thome K.J. (2019): **Retrieval of Atmospheric Parameters and Surface Reflectance from Visible and Shortwave Infrared Imaging Spectroscopy Data**. *Surveys in Geophysics*. 40, 333–360. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9488-9>

Verbesserte Vorverarbeitung durch die Zusammenführung von Laserscanning- und Hyperspektraldaten aus der Luft

- Brell M., Segl K., Guanter L., Bookhagen B. (2019): **3D hyperspectral point cloud generation: Fusing airborne laser scanning and hyperspectral imaging sensors for improved object-based information extraction**. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 149, 200–214. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.01.022>
- Brell M., Segl K., Guanter L., Bookhagen B. (2017): **Hyperspectral and Lidar Intensity Data Fusion: A Framework for the Rigorous Correction of Illumination, Anisotropic Effects, and Cross Calibration**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 55, 2799–2810. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2017.2654516>
- Brell M., Rogass C., Segl K., Bookhagen B., Guanter L. (2016): **Improving Sensor Fusion: A Parametric Method for the Geometric Coalignment of Airborne Hyperspectral and Lidar Data**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 54, 3460–3474. <https://doi.org/10.1109/TGRS.2016.2518930>

Thema: Methoden und Software

- Lillesand T., Kiefer R.W. & J. Chipman (2008): **Remote Sensing and Image Interpretation**. 6th Edition, Wiley.
- Schowengerdt (2007): **Remote Sensing: Models and Methods for Image Processing**. 3rd Edition, Elsevier
- Verrelst, J., Malenovsky, Z., Van der Tol, C. et al. (2019): **Quantifying Vegetation Biophysical Variables from Imaging Spectroscopy Data: A Review on Retrieval Methods**. *Surveys in Geophysics*. 40, 589–629. <https://doi.org/10.1007/s10712-018-9478-y>
- Bioucas-Dias, J.M., Plaza, A., Camps-Valls, G., Scheunders, P., Nasrabadi, N., Chanussot, J. (2013): **Hyperspectral remote sensing data analysis and future challenges**. *IEEE Geosci. Remote Sens. Mag* 1(2), 6–36. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2244672>
- Li, J., Plaza, A. (2016): **Hyperspectral Image Processing. Methods and Approaches**. In: Thenkabail, P.S. (Ed): *Remotely Sensed Data Characterization, Classification and Accuracies*. Taylor and Francis group. <https://www.umbc.edu/rssi/pl/people/aplaza/Papers/BookChapters/2016.Handbook.Hyperspectral.pdf>
- Lv, W., Wang, X. (2020): **Overview of Hyperspectral Image Classification**, *Journal of Sensors*, vol. 2020, Article ID 4817234. <https://doi.org/10.1155/2020/4817234>
- Ghamisi, P., Yokoya, N., Li, J., Liao, W., Liu, S., Plaza, J., Rasti, B. and Plaza, A. (2017): **Advances in Hyperspectral Image and Signal Processing: A Comprehensive Overview of the State of**

the Art. IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine, vol. 5, no. 4, pp. 37-78, Dec. 2017,
<https://doi.org/10.1109/MGRS.2017.2762087>

Thema: Einführung in die EnMAP-Box

- General information on the EnMAP-Box, a free and open source python plugin for QGIS: https://www.enmap.org/data_tools/enmapbox/
- Download, documentation and tutorials of and with the EnMAP-Box: <https://enmap-box.readthedocs.io/>

Finales Quiz: Lektion „Praktisches Training: Daten und Software“

In diesem finalen Quiz zur Lektion " Praktisches Training: Daten und Software" haben wir 10 Fragen für dich vorbereitet. **Du musst 50 % der Fragen richtig beantworten, um zur nächsten Lektion zu gelangen.** Du hast **unbegrenzt viele Versuche, um das Quiz zu bestehen.** Viel Glück!

Um ein Zertifikat zu erhalten, musst du die Lektionsquizze (3) sowie den Abschlusstest in der ONLINE-Version des Kurses bestehen.

Von welchen Sensoren kann man derzeit Daten erhalten? (Mehrfachauswahl)

- PRISMA
- AVIRIS NG
- EnMAP
- Hyperion
- SBG

Das Portal der EnMAP-Kampagne enthält Datensätze von Zielgebieten in welchen der folgenden Länder? Bitte rate oder schaue im Portal nach. (Mehrfachauswahl)

- Deutschland
- Spanien
- USA
- Namibia

Welche Vorverarbeitungsschritte sollten bei Hyperspektraldaten durchgeführt werden? (Mehrfachauswahl)

- Atmosphärische Korrektur
- Radiometrische Korrektur
- Kosmische Korrektur
- Geometrische Korrektur

Fülle die Lücken (Optionen: Gain, Offset)

Jeder Sensor hat seine eigenen Gains und Offsets, die auf die aufgezeichneten Signale angewendet werden. Der wird durch die Messung des geschlossenen Shutters bestimmt und stellt den thermisch induzierten Dunkelstrom dar. Der wird durch Messung der Reaktion des Sensors auf ein bekanntes Strahlungsziel im Labor bestimmt.

Was ist eine radiometrische Korrektur und was bewirkt sie? (Mehrfachauswahl)

- Sie wandelt digitale Zahlen in Strahldichte um
- Sie wandelt digitale Zahlen in Reflexion um
- Dabei werden die Daten mittels Nearest Neighbour, bilinearer Interpolation oder kubischer Konvolution neu gesampelt.
- Dabei handelt es sich um eine lineare Transformation, bei der Korrekturkoeffizienten (Gain und Offset) auf jeden Bildpunkt angewendet werden

Fülle die Lücken: Optionen: Spektrale Ungleichmäßigkeiten, Räumliche Ungleichmäßigkeiten, Radiometrische Ungleichmäßigkeiten, Zeitliche Ungleichmäßigkeiten, Radiometrische Korrektur, Geometrische Korrektur, Atmosphärische Korrektur

Der Smile-Effekt ist eine , die bei der berücksichtigt werden muss.

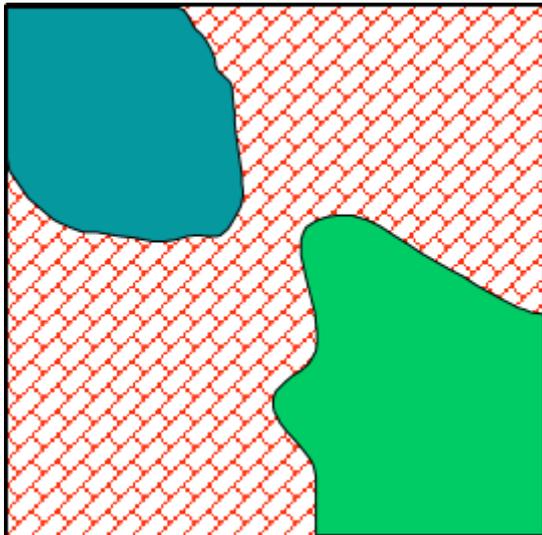
Warum kann es sinnvoll sein, die Dimensionalitätsreduktion vor oder als Teil der eigentlichen Bildanalyse anzuwenden? (Mehrfachauswahl)

- Weil es die Verarbeitung beschleunigen und die Rechenzeit senken kann
- Da Hyperspektraldaten oft sehr redundant sind und stark miteinander korrelierte Informationen enthalten
- Da redundante Daten Rauschen verursachen und zu suboptimalen Modellleistungen führen können
- Weil die hunderte von zusammenhängenden Bändern so verwirrend sind

Im Gegensatz zu Klassifizierungsmethoden ermöglichen Quantifizierungsmethoden ... (Mehrfachauswahl)

- eine direkte Identifizierung der Materialien
- die Bestimmung von Materialhäufigkeiten in Form von prozentualen Deckungsanteilen
- die Schätzung von Materialinhalten und -eigenschaften
- Zuordnung eindeutiger Klassen zu jedem Pixel

Nehmen wir an, du möchtest die relative Häufigkeit bekannter Materialien in jedem Bildpixel auf der Grundlage der spektralen Eigenschaften der Materialien bestimmen. Welche Methode würdest du wählen? (Einfachauswahl)



- Spectral Mixture Analysis (SMA) oder Linear Spectral Unmixing
- Spectral Angle Mapper (SAM)
- Support Vector Machine (SVM)
- Spectral Feature Fitting (SFF)

6 Auf Wiedersehen!

Gut gemacht! Du hast in den vergangenen Lektionen eine Menge über abbildende Spektroskopie (oder hyperspektrale Fernerkundung) gelernt. Machen wir weiter mit der **abschließenden Umfrage, die in dieser Lektion angeboten wird!** Die Umfrage hilft uns, diesen Kurs zu verbessern und dauert etwa 2 Minuten.

Danach wird es ernst...wir wollen dein Wissen mit dem Abschlussquiz testen!

6.1 Abschließende Nutzer:innenumfrage

Vielen Dank, dass du dir die Zeit nimmst, unsere letzte Umfrage zu beantworten (auf Englisch)! Das Feedback der früheren Teilnehmer:innen hat uns sehr geholfen, zusätzliche Informationen bereitzustellen und den gesamten Kurs zu verbessern. Wir sind bemüht, eure Antworten regelmäßig zu überprüfen und den Kurs entsprechend zu aktualisieren.

[Nimm an der abschließenden Nutzer:innenumfrage ONLINE Teil](#)

6.2 Abschlussquiz

Los geht's, unten findest du das letzte Quiz. Wenn du in den vorangegangenen Lektionen gut aufgepasst hast, solltest du in der Lage sein, die Fragen leicht zu beantworten. Aber auch wenn du die Fragen nicht leicht beantworten kannst, hast du eine unbegrenzte Anzahl von Versuchen, um zu bestehen - nicht nervös werden.

Bitte beachte: Um ein Zertifikat zu erhalten, musst du die **Lektionsquizze (3)** sowie das **Abschlussquiz** in der ONLINE-Version dieses Kurses bestehen.

Abschlussquiz

In diesem abschließenden Quiz für den MOOC haben wir 15 Fragen für dich vorbereitet. Denke daran, dass du **unbegrenzt viele Versuche hast, um das Quiz zu bestehen**. Sobald du das Quiz mit mehr als **70 % richtigen Antworten** (online) abgeschlossen hast, erhältst du dein **Abschlusszertifikat zusammen mit einem Zusatzdokument** (diploma supplement), das die Kursinhalte beschreibt! Wir drücken dir die Daumen!

Oh ... und vergiss nicht, dich zu verabschieden und unser Making-Of anzusehen!

Sortiere die Wellenlängenbereiche von kurzen bis langen Wellenlängen!

(Optionen: UV, VIS, Mikrowellen, TIR, SWIR, MIR, NIR)

Kurze Wellenlängen Wähle ein Element

Lange Wellenlängen Wähle ein Element

Kannst du einige Vorteile von Daten der abbildenden Spektroskopie nennen?

(Mehrfachauswahl)

- Die Daten enthalten ein hohes Maß an spektralen Details
- Die Daten sind sehr günstig zu erheben
- Die Daten ermöglichen den Zugriff auf eine Reihe verschiedener Oberflächenvariablen
- Die Analyse ist im Vergleich zu anderen Arten von Fernerkundungsdaten viel schneller und einfacher

Erinnere dich an die Grundgesetze der Strahlung - welche der folgenden Aussagen ist richtig? (Mehrfachauswahl)

- Alle Objekte > 0 K emittieren Strahlungsenergie
- Heißere Objekte strahlen mehr Energie pro Flächeneinheit ab als kältere Objekte
- Je heißer der strahlende Körper ist, desto kürzer ist die Wellenlänge des Strahlungsmaximums
- Perfekte Absorber (perfekte Emittier) werden als schwarze Löcher bezeichnet

Welches Oberflächenmaterial hat in der Regel den geringsten Reflexionsgrad im SWIR: (Einfachauswahl)

- Klares Wasser
- Schnee
- Trockene Vegetation
- Offener Boden

Welche Vorverarbeitungsschritte sollten bei Hyperspektraldaten nicht durchgeführt werden? (Einfachauswahl)

- Kosmetische Korrektur
- Geometrische Korrektur
- Atmosphärische Korrektur
- Radiometrische Korrektur

Was ist eine radiometrische Korrektur und was bewirkt sie? (Mehrfachauswahl)

- Sie wandelt digitale Zahlen in Strahldichte um
- Sie wandelt digitale Zahlen in Reflexion um
- Dabei werden die Daten mittels Nearest Neighbour, bilinearer Interpolation oder kubischer Faltung neu gesampelt
- Es handelt sich um eine lineare Transformation, bei der Korrekturkoeffizienten (Gain und Offset) auf jedes Bildpixel angewendet werden

Warum kann es sinnvoll sein, die Dimensionalitätsreduktion vor oder als Teil der eigentlichen Bildanalyse durchzuführen? (Mehrfachauswahl)

- Weil das menschliche Gehirn Schwierigkeiten mit mehr als drei Dimensionen hat
- Weil es die Verarbeitung beschleunigen und die Rechenzeit senken kann
- Da Hyperspektraldaten oft sehr redundant sind und stark miteinander korrelierte Informationen enthalten
- Da redundante Daten Rauschen verursachen und zu suboptimalen Modellleistungen führen können

Du hast in diesem Kurs verschiedene Datenquellen kennengelernt. Ordne die folgenden Ressourcen den vier Kategorien zu (Fülle die Lücken)

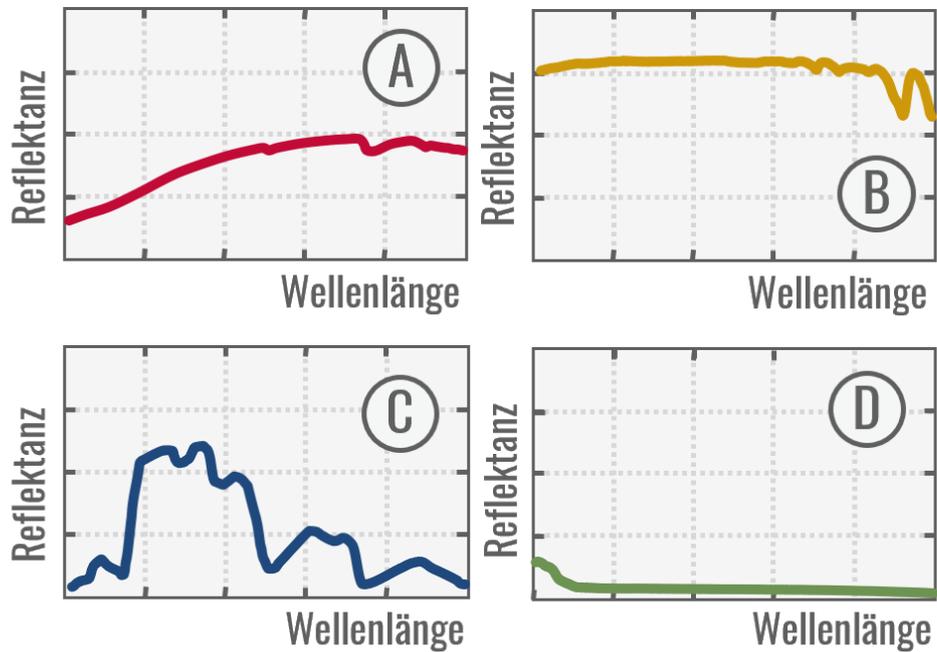
Optionen: weltraumgestützt (2x), luftgestützt (2x), Spektralbibliothek (2x)

EnMAP Kampagnen Portal USGS EarthExplorer PRISMA Daten Portal AVIRIS NG Specchio ECOSTRESS **Welcher Effekt bezieht sich auf spektrale Ungleichmäßigkeiten?**

(Einfachauswahl)

- Der sogenannte „Keystone“ Effekt
- Der sogenannte „Smile“ Effekt

Ordne den folgenden Spektren die richtigen Kategorien zu:



- A Wähle ein Element
- B Wähle ein Element
- C Wähle ein Element
- D Wähle ein Element

Was ist ein sogenanntes spektrales "Endmember" in der Fernerkundung?

(Einfachauswahl)

- ein Ziel oder ein Spektrum mit sehr geringem Reflexionsgrad
- das letzte Ziel oder Spektrum in einer Spektralbibliothek
- ein Ziel oder ein Spektrum von sehr hoher Reinheit
- ein unbekanntes Ziel oder Spektrum

Wie lautet die richtige Abkürzung für die bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion? (Einfachauswahl)

- BRF
- BDRF
- BRDF
- BDRDF

Welche Faktoren beeinflussen den Reflexionsgrad der Vegetation?

(Mehrfachauswahl)

- Wassergehalt
- Art
- Phänologie
- Gesundheit

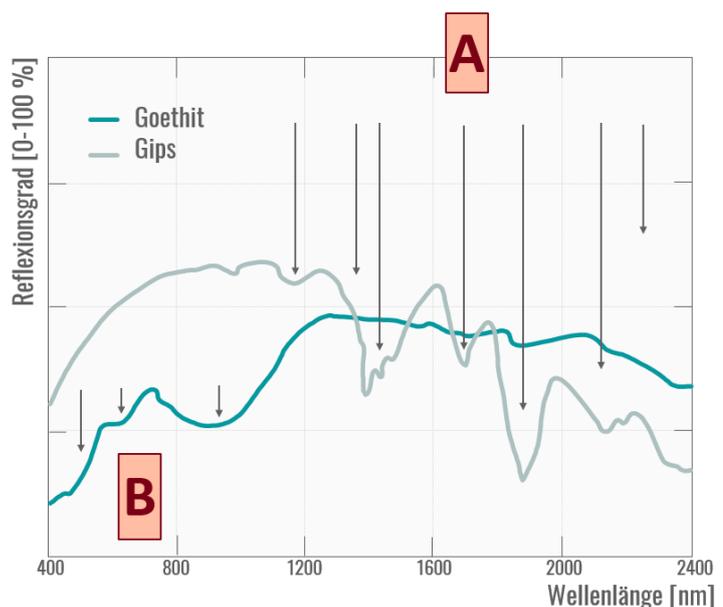
Was ist eine Lambertsche Oberfläche? (Einfachauswahl)

- Ein idealer spiegelnder Reflektor
- Ein idealer diffuser Reflektor
- Ein Kalibrierungsobjekt
- Ein perfekter Emitter

Welcher Bereich der auftretenden Absorptionsmerkmale ist auf "Schwingungsprozesse" und welcher auf "elektronische Prozesse" zurückzuführen? (Optionen: Ausgeprägte elektronische Prozesse (z. B. Fe-Bänder), Schwingungsbänder (z. B. gebundenes oder ungebundenes Wasser (H₂O, OH- und CO))

A Wähle ein Element

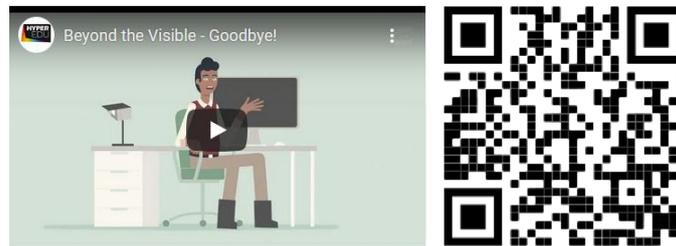
B Wähle ein Element



6.3 Auf Wiedersehen!

Vielen Dank, dass du den gesamten MOOC zur hyperspektralen Fernerkundung absolviert hast! Wir hoffen, du hattest genauso viel Spaß bei der Teilnahme wie wir bei der Erstellung dieses Kurses (und eine ähnlich steile Lernkurve) und dass du ein aktives Mitglied der hyperspektralen Community wirst! Du weißt, die Daten sind komplex und wir brauchen eine Menge Expert:innen...

VIDEO: Basic-25: Beyond the Visible – Goodbye!



URL of the video: <https://www.youtube.com/watch?v=KfWYVZlu6tM>

Wenn du noch **mehr lernen möchtest, sieh dir die Ressourcensektionen der Lektionen an**, in denen wir versucht haben, eine Menge zusätzliches Material und weiterführende Literatur zu verlinken. Wenn **du üben möchtest, installiere die EnMAP-Box und sieh dir die anderen Tutorials** und unsere MOOCs zu spezifischen Anwendungen an.

Wie viele Personen waren beteiligt? Hast du schon geraten?

Übrigens wurde dieser MOOC ermöglicht durch das Know-how, die Kreativität und die harte Arbeit von mehr als - kannst du es erraten? - brillanten Menschen. **Vielen Dank an euch alle!!!**

JETZT hast du endlich die Chance, offiziell zu erraten, wie viele Personen an der Erstellung dieses MOOCs beteiligt waren

- > 5
- > 15
- > 35
- > 50

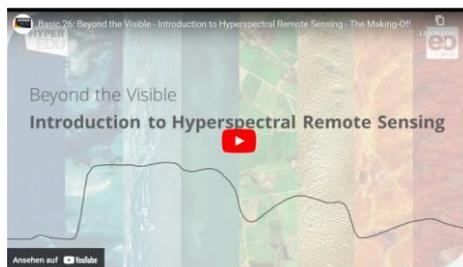
6.4 Making of!

Echt? Die unglaubliche Zahl von **mehr als 50 Personen** war an der Erstellung dieses Kurses beteiligt (und da sind Verpflegung, Drehortsuche und Make-up noch gar nicht eingerechnet)!

DANKE AN EUCH ALLE, dass ihr euer Wissen, euer Material und eure wertvolle Zeit mit uns teilt!

Schau dir das Making-of-Video an!

VIDEO: Basic-26: Beyond the Visible – Introduction to Hyperspectral Remote Sensing – The Making-Of!



URL of the video:

<https://youtu.be/xHSsP3eAIUY>



Concept, content and realisation
Arlena Brosinsky
Charlotte Wilczok
Saskia Foerster

Screencasts
Ettore Lopinto
Benjamin Jakimow
Fabian Thiel

Technical support
Robert Eckardt
Tobias Burger
Christian Hohmann
Marcel Ludwig,
Heinrich Hecht,
Antonia Cozacu
Katrin Koch
Pauline Müller

Voice of Charly
David Beamish

Content / starring field work
Katja Berger, Tobias Hank,
Matthias Wocher, Benedikt Hartweg,
Marco Maier, Stefanie Steinhauser

Filming and post-production
Robert Eckardt
Tino Sieland

Content/starring
Sabine Chabrilat
Shanyu Zhou
Nicole Köllner
Mathias Bochow
Astrid Bracher
Mariana Soppa
Nicole Pinnel
Andreas Hueni &
AVIRIS-NG team

Content review
Karl Segl
Maximilian Brell

Language review and translation
Alison Beamish
David Beamish
Brennda Braga
Claudia Giménez
Poblador

Visual design
Sara Makdessi,
Theres Kuester

Consultation/support
Kai Heckel
Sebastian van der Linden
Anke Schickling
Sebastian Fischer
Michael Bock
Tobias Storch
Nora Meyer zu Erpen

Beta-testing
Theres Kuester
Sylvia Magnussen
Helge Daempfling
Fabian Faßnacht
Christopher Loy



MOOC Dokument

Beyond the Visible – Einführung in die hyperspektrale Fernerkundung

Version: 1.0 (Kursversion 3.0)

Urheberrecht: Sofern nicht anders angegeben, wird der Kursinhalt kostenlos unter einer Creative Commons Attribution-Share Alike 4.0 International License CC BY-SA 4.0 zur Verfügung gestellt.



Zitieren als: A. Brosinsky, C. Wilczok, S. Foerster (2025). **Beyond the Visible – Einführung in die hyperspektrale Fernerkundung.** Offline-Dokument zum MOOC. HYPERedu, EnMAP education initiative, DeutschesGeoForschungszentrum GFZ; ursprünglich veröffentlicht November 2021, 2nd revision November 2022. 10.48440/enmap.2024.002