

# 20

## Monitoring mit hyperspektraler Fernerkundung

Kartierung der Baumvitalität in borkenkäferbefallenen Fichten mittels hyperspektraler Fernerkundung



**Im Juni 2021 wurde im Rahmen einer von der ESA, der NASA-JPL und dem RSL Zürich europaweit organisierten Kampagne ein hyperspektraler Datensatz über einem Teil des Nationalparks aufgenommen. Diese Bilddaten werden mit Hilfe spezieller Kamerasysteme aus einem Flugzeug aufgenommen und bilden einen Wellenlängenbereich von 400 bis 2500 nm in hoher räumlicher und spektraler Auflösung ab. Das System zeichnet Daten auch im nahen und kurzwelligen Infrarot auf, das für das menschliche Auge nicht sichtbar ist. In diesen Wellenlängenbereichen lassen sich insbesondere Zustand und Vitalität von Vegetation gut untersuchen. In einer gemeinsamen Forschungskampagne des Luxembourg Institute of Science and Technology (LIST), der Universität Trier (UT) und des Nationalparks Hunsrück-Hochwald wurden überflugbegleitend von Borkenkäfern befallene Fichten untersucht. Die erhobenen Daten sollen helfen, ein besseres Verständnis der Wechselwirkungen von durch den Larvenfraß der Borkenkäfer verursachten Schäden und dem Reflexionssignal sowie der daraus abgeleiteten Blatt- und Kroneneigenschaften der betroffenen Bäume zu gewinnen.**

## Einleitung

Die mitteleuropäischen Wälder sehen sich in zunehmendem Maße mit biotischen und abiotischen Störungen konfrontiert. Extremwetterereignisse, wie schwere Stürme in den Jahren 2018 und 2022 sowie langanhaltende Dürreperioden von 2018 bis 2020 und erneut 2022 und 2023 in Verbindung mit hohen bis extremen Sommertemperaturen, haben die Vitalität der Wälder geschwächt (BMEL, 2023). In besonderem Maße leiden derzeit Fichtenbestände unter dem massenhaften Befall von Borkenkäfern, der seit 2018 zu katastrophalen Schäden geführt hat. Der Hauptverursacher dieser Schäden in den Fichtenwäldern ist der Buchdrucker (*Ips typographus*).

Die Entwicklung des Buchdruckers wird maßgeblich von der Temperatur beeinflusst. Während des Frühlings, wenn die Lufttemperatur auf etwa 16 °C ansteigt, beginnen die Käfer, die im Boden oder unter der Rinde überwintert haben, auszuschwärmen und fliegen zu geeigneten Wirtsbäumen (Nierhaus-Wunderwald, 2004). Nachdem sie den Wirtsbaum erreicht haben, dringen sie durch die Rinde, um Zugang zu den Kambium- und Phloemschichten zu erhalten, wo sie Gänge anlegen und ihre Eier ablegen. Die Zeitspanne von der Eiablage bis zum Schwärmen der jungen Käfer hängt stark von der Temperatur ab und erstreckt sich über einen Zeitraum von sechs bis zehn Wochen. Dies ermöglicht normalerweise zwei bis höchstens drei Generationen pro Jahr (Hoch et al., 2020).

Um die Ausbreitung des Buchdruckers einzudämmen, ist ein intensives Monitoring der betroffenen Flächen erforderlich. Die frühzeitige Identifikation erster Anzeichen eines Befalls ist dabei besonders entscheidend. Nur wenn betroffene Bäume noch vor Abschluss der Metamorphose von der Larve zum Jungkäfer aus dem Wald entfernt oder entrinde werden, kann das Ausschwärmen der neuen Käfergeneration wirksam unterbunden werden (Fettig et al., 2022).

Im Nationalpark Hunsrück-Hochwald (NLPHH) werden ausschließlich im Randbereich Waldschutzmaßnahmen durchgeführt. Regelmäßige und dichte terrestrische Kontrollen, kombiniert mit rasch umgesetzten forstlichen Maßnahmen, sollen verhindern, dass sich der Befall von Käfern aus dem Nationalpark in die angrenzenden Wälder ausbreitet. In den Kernbereichen des Nationalparks führt der erhebliche Käferbefall in den Fichtenreinbeständen zu Störungen, die eine Dynamik in der Entwicklung dieser Flächen auslösen. Besonders die daraus resultierenden Totholz- und Offenbereiche können ökologisch von großer Bedeutung sein (Müller et al., 2008).

Neben der terrestrischen Überwachung bietet sich insbesondere auch ein fernerkundliches Monitoring an, das eine gleichzeitige Beobachtung großer Gebiete in hoher zeitlicher Frequenz erlaubt. In den letzten Jahren wurden eine Reihe von Studien und Ansätzen zur Früherkennung von Borkenkäferbefall sowie dem Monitoring des durch den Käferfraß entstandenen Schadens publiziert (Abdul-

lah et al., 2019; Bárta et al., 2021; Mandl and Lang, 2023). Obwohl zahlreiche Studien zu diesem Thema veröffentlicht wurden, besteht weiterhin Forschungsbedarf, insbesondere bei der Identifikation geeigneter Sensorsysteme und der Entwicklung von methodischen Ansätzen sowie Algorithmen für die Früherkennung des Befalls. Die fernerkundliche Früherkennung von Borkenkäferbefall erfordert insbesondere ein verbessertes Verständnis der Beziehung zwischen Schadmerkmalen, Pflanzeigenschaften und den resultierenden Nadel- und Kronenreflexionen.

Der NLPHH bietet sich als ideales Freiluftlabor für aktuelle Forschungen an, da hier Fichtenbestände in verschiedenen Befallsstadien mithilfe moderner Sensoren und Methoden untersucht werden können. Die bereits vorhandene Forschungsdateninfrastruktur bildet zudem eine bedeutende Grundlage für anwendungsbezogene Forschung.

## Die CHIME-Mission und AVIRIS-Kampagne

Die *Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment*, kurz CHIME, ist eine neue Forschungsmission der ESA und der Europäischen Kommission. Ihr Ziel ist die Erhebung grundlegender Daten und die Entwicklung von Methoden, die in der geplanten Fortführung des Copernicus-Programms berücksichtigt werden sollen (Rast et al., 2021). Im Rahmen der CHIME-Kampagne wurde 2021 das flugzeuggestützte hyperspektrale Aufnahmesystem AVIRIS-NG (Airborne Visible InfraRed Imaging Spectrometer – Next Generation) über mehr als 20 Testflächen in ganz Europa eingesetzt. Durch eine erfolgreiche Bewerbung konnten Wissenschaftler von LIST, UT und NLPHH erreichen, dass auch der Nationalpark als eine der europäischen Testflächen berücksichtigt wird.

Hyperspektrale Aufnahmesysteme sind spektral hochauflösende, bildgebende Sensorsysteme, die Objektreflexionen im Wellenlängenbereich von ungefähr 400 bis 2500 nm in hoher Auflösung erfassen. Dies umfasst die Bereiche des sichtbaren Lichts, des nahen Infrarots und des kurzwelligen Infrarots. Die Daten bieten hochdimensionale Informationen, die spezifische spektrale Signaturen von Materialien identifizieren und feine Unterschiede in der chemischen Zusammensetzung oder den physikalischen Eigenschaften von Objekten erfassen können (Bioucas-Dias et al., 2013).

Im Rahmen der europaweiten CHIME-Kampagne, finanziert und organisiert von ESA, NASA-JPL und RSL Zürich, wurden am 23. Juli 2021 hyperspektrale AVIRIS-NG-Daten aus der Luft über einem Standort im NLPHH erfasst. Die Flugzeugaufnahmen erfolgten in geringer Höhe mit einer Auflösung von einem Meter pro Pixel, um einzelne Baumkronen zu identifizieren. Diese wurden nachträglich von NASA-JPL und RSL auf geolokalisierte Überkronen-Reflexion korrigiert. Parallel dazu fand eine intensive Bodenkampagne statt. Experten identifizierten entlang von Transekten 32 Fichten mit unterschiedlichem Schädigungsgrad, die anschließend gefällt wurden. Die Klassifizierung umfasste drei Stufen: gesund (grüne Baumkronen, keine Anzeichen von Borkenkäferbefall), leicht bis mäßig geschädigt (befallene Bäume mit einsetzendem Larvenfraß; erste Anzeichen wie Nadelverluste oder Farbänderungen der Nadeln sind erkennbar) sowie schwer geschädigt (starke Schadmerkmale wie Nadelverlust, abfallende Rinde, starke Nadelverfärbungen sind sichtbar).

Nach dem Fällen wurden die Baumpositionen submetergenau erfasst und zusammen mit Merkmalen und Fotos in einer Geodatenbank gespeichert (vgl. Abbildung 2). Es wurden diverse baumspezifische Merkmale erfasst, darunter allgemeine Merkmale wie Baumdurchmesser, Baumdichte und Strauch- und Krautschichten, Baumkronenmerkmale wie Nadelfarbe und Grad der Entlaubung, Stammmerkmale wie Eier, Larven, Puppen, juvenile und adulte Käfer sowie Labormessungen des Laubwerks wie Blattreflexion, Blattwasserkonzentration und Blattstickstoffkonzentration.

Die simultane Erfassung aus der Luft und die Beprobung von Fichten mit unterschiedlichen Befallsmerkmalen bieten ideale Bedingungen, um die Wechselwirkungen zwischen der Fraßaktivität der Borkenkäferlarven, den sich daraufhin ändernden physiologischen Merkmalen der Fichte und den damit verbundenen Veränderungen des Reflexionssignals zu untersuchen.

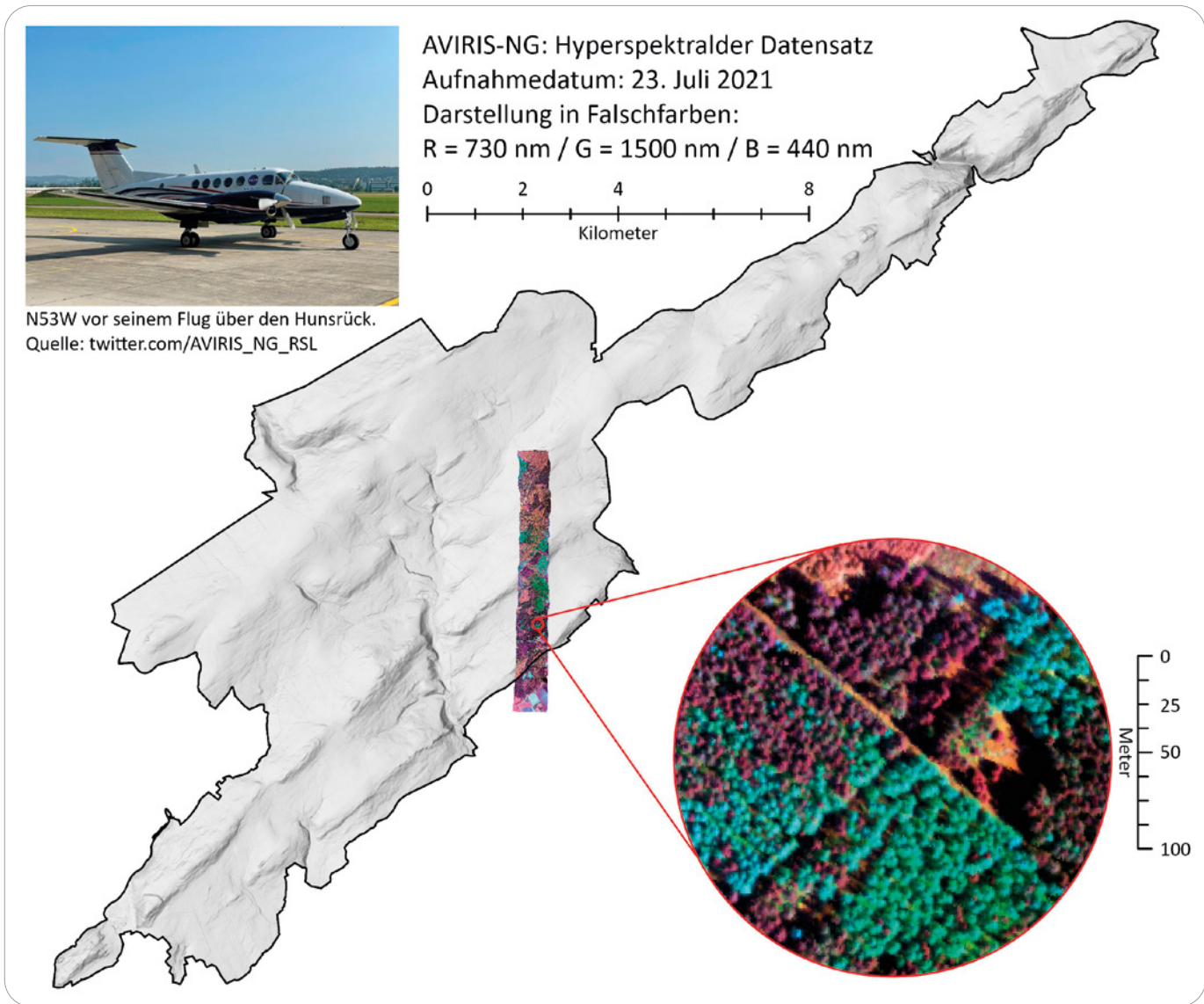


Abb. 1: Lage und Übersicht des AVIRIS-NG-Flugstreifens im Nationalpark Hunsrück-Hochwald.

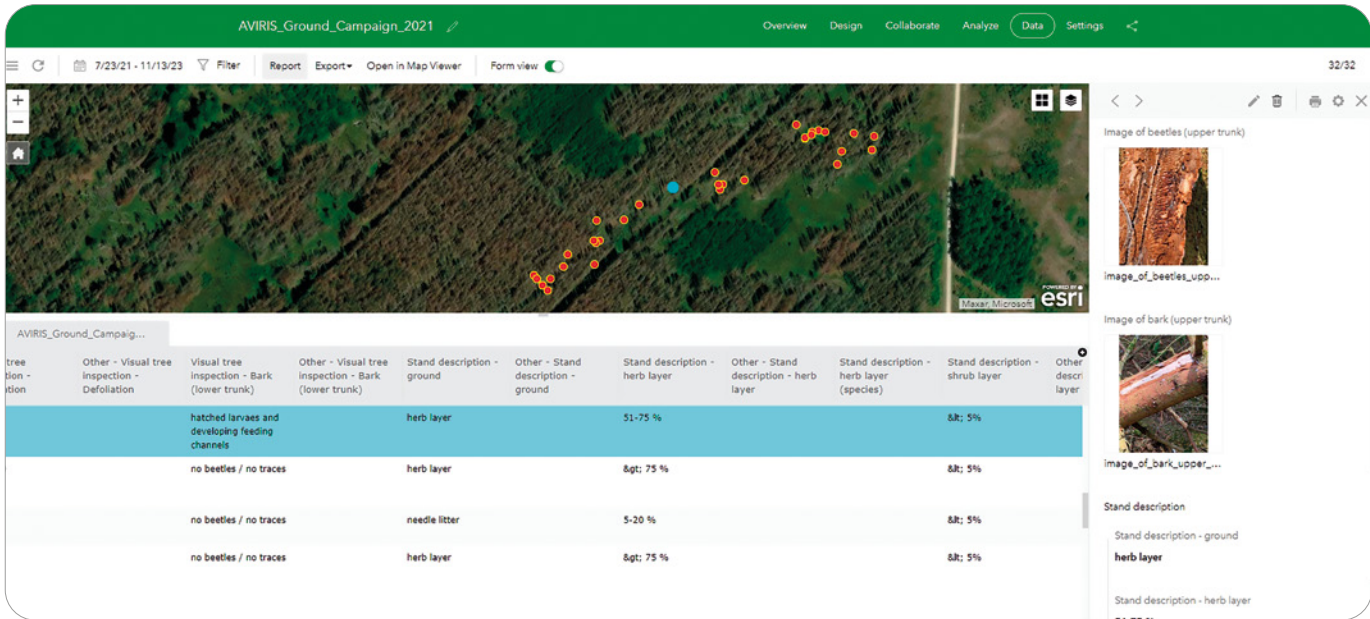
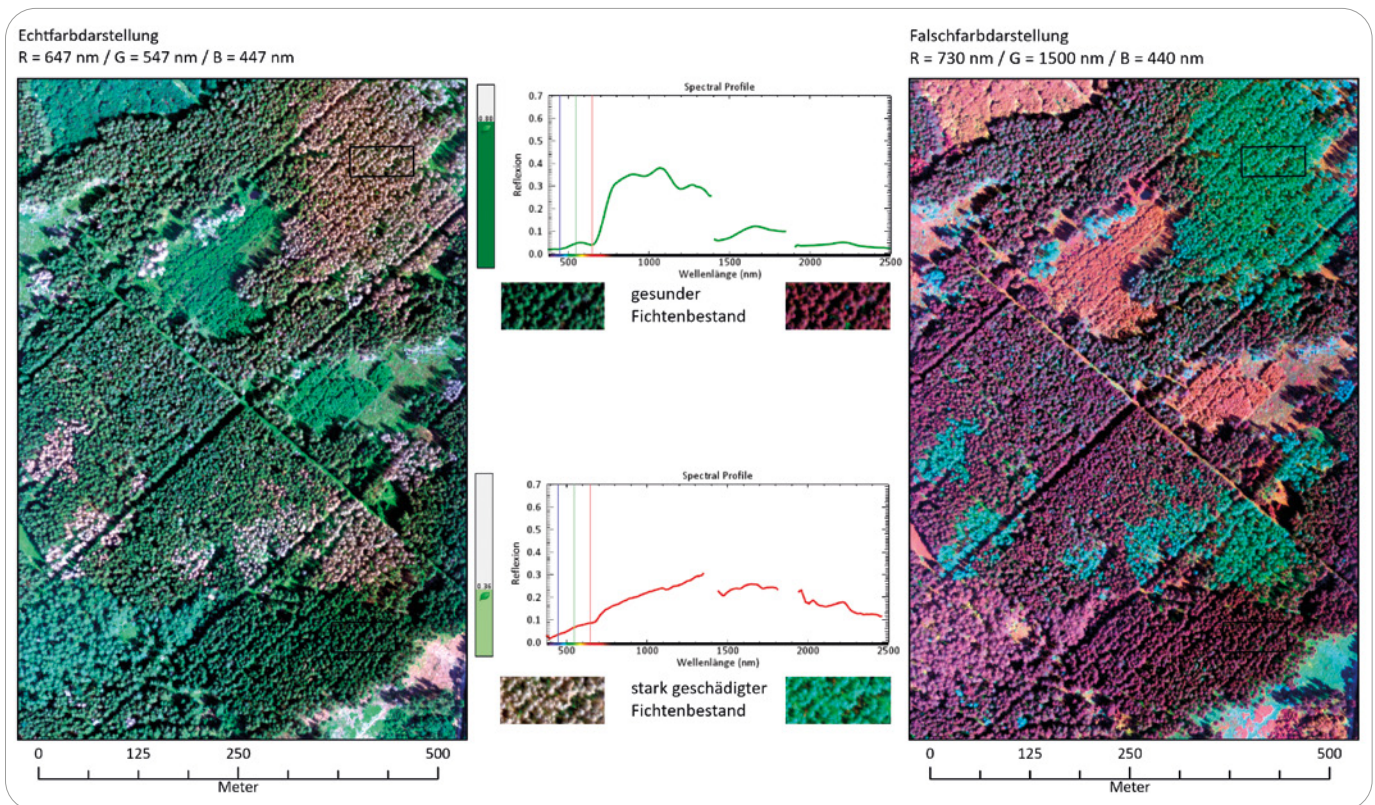


Abb. 2: Auszug aus der Geodatenbank mit Darstellung der erfassten Baummerkmale während der überflugbegleitenden Geländekampagne.



**Abb. 3:** Ausschnitt aus dem AVIRIS-Hyperspektraldatensatz. Aufnahmedatum: 23.07.2021. Echtfarbdarstellung (links), Falschfarbdarstellung (rechts) und Spektren (Mitte). Links neben den Spektren zeigt der Balken den NDVI (normalized difference vegetation index), ein Maß für die Vitalität.

Abbildung 3 zeigt einen Abschnitt des am 23.07.21 aufgezeichneten AVIRIS-Hyperspektraldatensatzes. Der linke Teil der Abbildung zeigt eine Echtfarbdarstellung, die auf den sichtbaren Lichtbereich begrenzt ist. Hier ist der klare Unterschied zwischen gesunden Fichtenbeständen (grün) und stark geschädigten bis bereits abgestorbenen Beständen (braun) gut sichtbar.

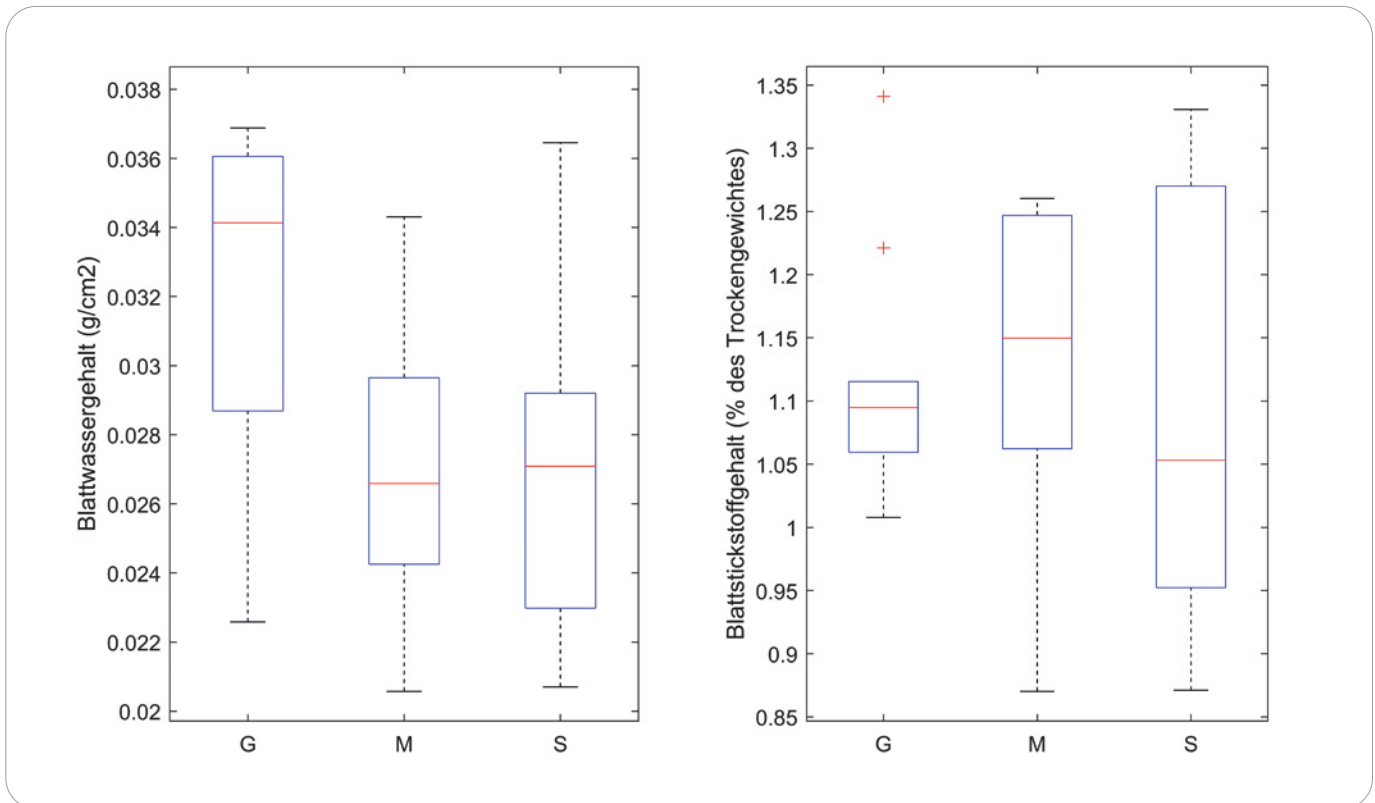
Der rechte Bildabschnitt verwendet eine Falschfarbdarstellung, um Wellenlängenbereiche aus dem nahen und kurzwelligen Infrarot zu visualisieren. Diese Bereiche sind für das menschliche Auge unsichtbar, zeigen jedoch Unterschiede zwischen gesunder, photosynthetisch aktiver und geschädigter oder gestresster Vegetation besonders deutlich auf. Die Falschfarbdarstellung wirkt insgesamt kontrastreicher und zeigt mehr farbliche Nuancen zwischen den gesunden und befallenen Beständen.

Die Reflexionsspektren in der Mitte der Abbildungen repräsentieren den charakteristischen Verlauf für gesunde Vegetation (oben) und stark geschädigte bis abgestorbene Vegetation (unten).

## Methodisches Vorgehen

Auf Basis des vorliegenden Hyperspektraldatensatzes wurden die beprobten Fichten im Bild identifiziert und die Reflexionsspektren auf Einzelkronenebene extrahiert. Die Gruppen umfassen jeweils 11 Bäume für „gesunde Fichten“, 8 Bäume für „schwach bis mäßig geschädigte Fichten“ und 10 Bäume für „stark geschädigte Fichten“. Die Reflexionssignaturen, Labordaten (Blattwasserkonzentration, Blattstickstoffkonzentration) und Standortdaten wurden für jeden Baum in einer Datenbank gespeichert.

Um den Zusammenhang von Schädigungsgrad, Reflexionssignatur und Labordaten systematisch zu untersuchen, wurden statistische Analysen und Modellierungen des Reflexionssignals durchgeführt. Während satellitenbasierte multispektrale Aufnahmesysteme die Ableitung einfacher Vegetationsindizes ermöglichen, die als Proxy für die Charakterisierung von Vegetationszuständen und -eigenschaften dienen (z.B. Blattfläche und Biomasse), ermöglicht die spektrale Auflösung von Hyperspektraldaten direkte Rückschlüsse auf Blattinhaltsstoffe. Spezielle Strahlungstransfermodelle wie PROSPECT5 und 4SAIL werden genutzt, um die optischen Eigenschaften von Blättern und Beständen zu simulieren (Jacquemoud et



**Abb. 4: Ergebnisse der Laboranalysen. Blattwassergehalt (links) und Blattstickstoffgehalt (rechts) für gesunde (G), leicht-mäßig geschädigte (M) und stark geschädigte (S) Fichten.**

al., 2000). PROSPECT, ein Modell für die optischen Eigenschaften von Blättern, beschreibt die Lichtabsorption und -reflexion basierend auf den chemischen und strukturellen Eigenschaften der Blätter. Das Modell SAIL (Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves) behandelt die bidirektionale Reflexion von Licht in einem Bestand, unter Berücksichtigung der Struktur des Bestandes. Die kombinierte Nutzung beider Modelle (PROSAIL) erlaubt die Berücksichtigung sowohl spektraler Eigenschaften von Blättern als auch bidirektionaler Reflexionseigenschaften von Beständen (Jacquemoud et al., 2009). Für forstliche Kartierungen aus hyperspektralen Satellitenbildern eignet sich insbesondere auch das *Invertible Forest Reflectance Modell* (Atzberger, 2000; Schlerf and Atzberger, 2012, 2006), da es zusätzlich zu PROSAIL auch den Einfluss der Baumkronen berücksichtigt.

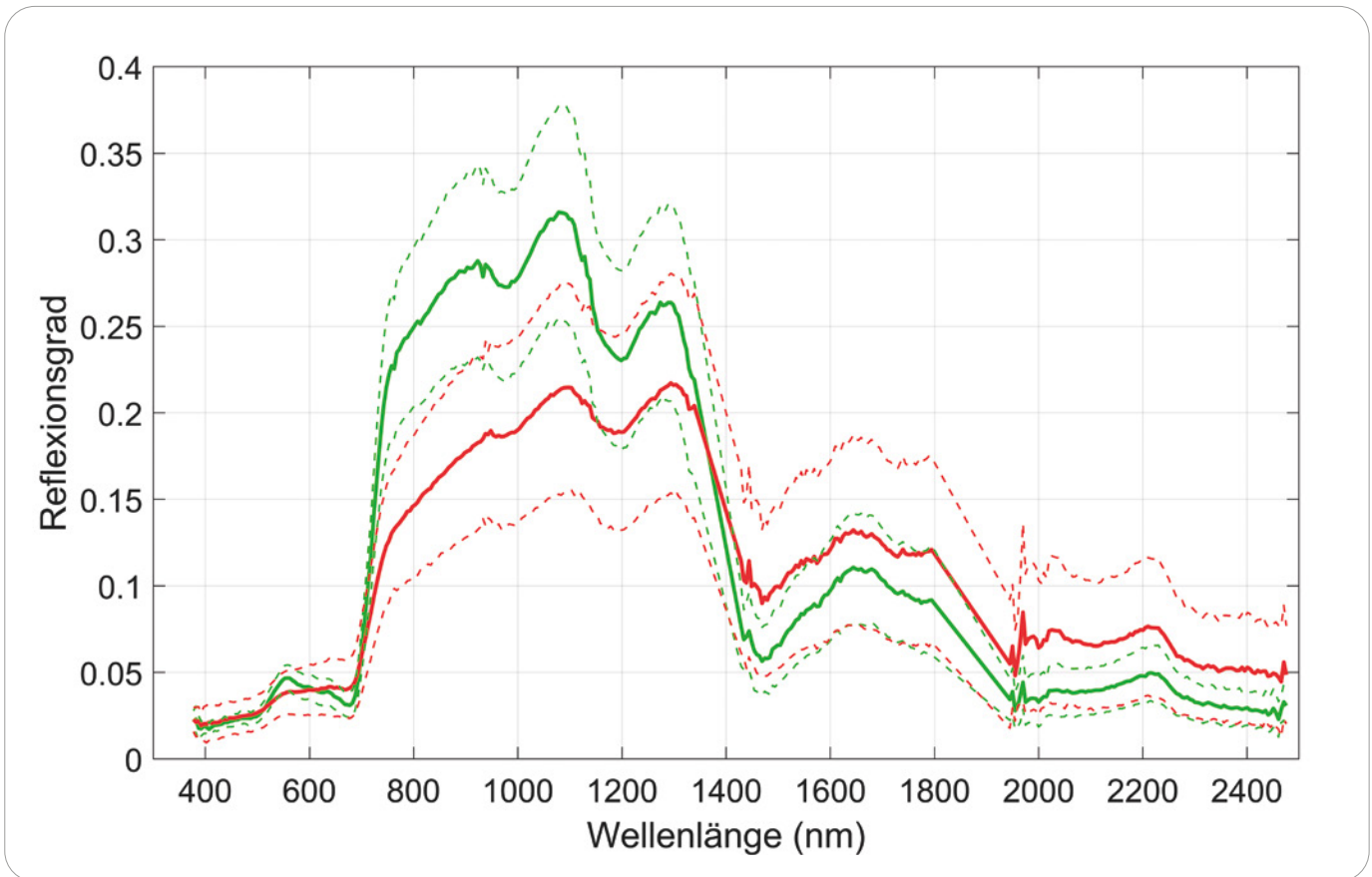
Neben der Simulation von Reflexionsspektren auf Basis biochemischer Blatteigenschaften oder Bestandsstruktur kann durch Inversion der Strahlungstransfermodelle aus den gemessenen Daten auf die zugrunde liegenden Parameter des Modells geschlossen werden. Die Modellinversion ermöglicht die analytische Arbeit mit den hyperspektralen Bilddaten, wodurch für jedes Bildpixel eines Vegetationsbestandes die biophysikalischen Eigen-

schaften der beobachteten Pflanze bzw. des Bestandes bestimmt werden können (Darvishzadeh et al., 2008). In dieser Studie wurden unter Verwendung der ARTMO-Toolbox (Verrelst et al., n.d.) der Blattflächenindex (LAI), der Gesamtchlorophyllgehalt ( $C_{ab}$ ) und der Blattwassergehalt ( $C_w$ ) für jedes Bildpixel abgeleitet und die Ergebnisse für das gesamte Untersuchungsgebiet visualisiert.

## Ergebnisse und Diskussion

Die Analyse der Fichtennadeln zeigt zwischen den Schadklassen größere Unterschiede im Blattwassergehalt und geringere Unterschiede im Blattstickstoffgehalt (Abb. 4). Im Vergleich zu gesunden Bäumen weisen mittel- und stark geschädigte Bäume einen signifikant geringeren Blattwassergehalt auf, während sich für den Blattstickstoffgehalt keine signifikanten Unterschiede ergeben.

Eine erste Analyse der Reflexionssignaturen der drei betrachteten Gruppen zeigt deutliche Unterschiede im Reflexionsverhalten. Diese Unterschiede deuten auf ausgeprägte Veränderungen des Blattwassergehalts und eine Degradation der Blattpigmente mit fortschreitender Schädigung der Fichten durch den Larvenfraß des Bor-



**Abb. 5: Spektralsignaturen der untersuchten Fichten. Dargestellt ist für gesunde (grün) und geschädigte (rot) Fichten der mittlere Reflexionsgrad und je eine Standardabweichung nach oben und unten vom Mittel. Gut erkennbar ist eine erhöhte Reflexion der geschädigten Bäume im roten Wellenlängenbereich (ca. 670 nm) und im kurzwelligen Infrarot (ab ca. 1.500 nm) sowie eine reduzierte Reflexion im nahen Infrarot (ca. 800–1.400 nm). Die Wellenlängenbereiche um 1.400, 1.900 und 2.500 nm sind von atmosphärischem Wasserdampf beeinflusst und werden bei den Analysen ausgespart.**

kenkäfers hin. In Abbildung 5 sind die aus dem Hyperspektraldatensatz abgeleiteten Spektralsignaturen für die Gruppen „gesund“, „leicht geschädigt“ und „stark geschädigt“ dargestellt. Hier sind die Schädigungen durch den Larvenfraß im Reflexionssignal deutlich erkennbar.

Die gesunden Fichten zeigen das charakteristische Reflexionssignal von photosynthetisch aktiver Vegetation. Bei den leicht geschädigten Fichten ist bereits ein bedeutender Rückgang des Reflexionsniveaus im nahen Infrarot (~800 nm) zu verzeichnen, begleitet von einer leichten Abschwächung des „green Peak“ im Bereich der Pigmentabsorption (~550 nm). In der Gruppe mit starker Schädigung zeigen die ausgeblichenen Nadeln praktisch kein Signal mehr in diesem Bereich. Zudem lassen sich in dieser Gruppe weitere ausgeprägte Signalveränderungen im nahen und kurzwelligen Infrarot beobachten.

Die erfolgreich durchgeführte Modellinversion ermöglicht die flächige Darstellung des abgeleiteten Blattflächenindex (LAI), des Bestandswassergehalts und des Gesamtchlorophyllgehalts. In Abbildung 6 sind ein Ausschnitt des Datensatzes in Echtfarbdarstellung sowie der Blattflächenindex, der Bestandswassergehalt und das Gesamtchlorophyll in graduiertem Farbdarstellung dargestellt. Durch den Vergleich der deutlich sichtbaren Flächen mit starker Schädigung im Originaldatensatz mit den abgeleiteten Ergebnissen werden klare Zusammenhänge ersichtlich. Insbesondere der LAI und der Bestandswassergehalt zeigen hier minimale Werte, während der Gesamtchlorophyllgehalt nur Werte um  $30 \mu\text{g cm}^{-2}$  erreicht. Die höchsten LAI-Werte im dargestellten Bildausschnitt gehören zu dichten Laubbaumbeständen (Markierung C). Gesunde Fichten (Markierung A) weisen LAI-Werte zwischen 5 und 6 auf, während die geschädigten Fichten (Markierung B) deutlich niedrigere Werte aufweisen. Auch beim Gesamtchlorophyllgehalt sind räumliche Unterschiede zwischen den einzelnen Gruppen erkennbar.

Die ersten Auswertungen der umfangreichen Daten bestätigen innerhalb dieser Studie die bereits bekannten Rückkopplungen des Larvenfraßes des Buchdruckers auf die biophysikalischen Eigenschaften der Fichten. Die Analysen der Spektralsignaturen der beprobten Bäume zeigen typische Veränderungen zwischen den drei Gruppen (nicht geschädigt, schwach geschädigt und stark geschädigt). Die deutliche Abnahme des Gesamtchlorophylls und des Blattwassergehalts wurde auch von Abdullah et al., 2019 im Nationalpark Bayerischer Wald beschrieben.

## Fazit

Über die aufwändige Gelände- und Laborkampagne und den begleitenden hyperspektralen Bildflug konnten wichtige Daten zur Untersuchung der Auswirkungen des Buchdruckers auf Fichten erhoben werden. Die Ergebnisse zeigen, dass geschädigte Bäume von gesunden Bäumen stark abweichende Spektralsignaturen aufweisen, was auf Veränderungen im Blattchlorophyll-, Blattwassergehalt und im grünen Blattflächenindex hinweist. Diese Veränderungen konnten auch mit einem Strahlungstransfermodell simuliert werden. Die spektralen

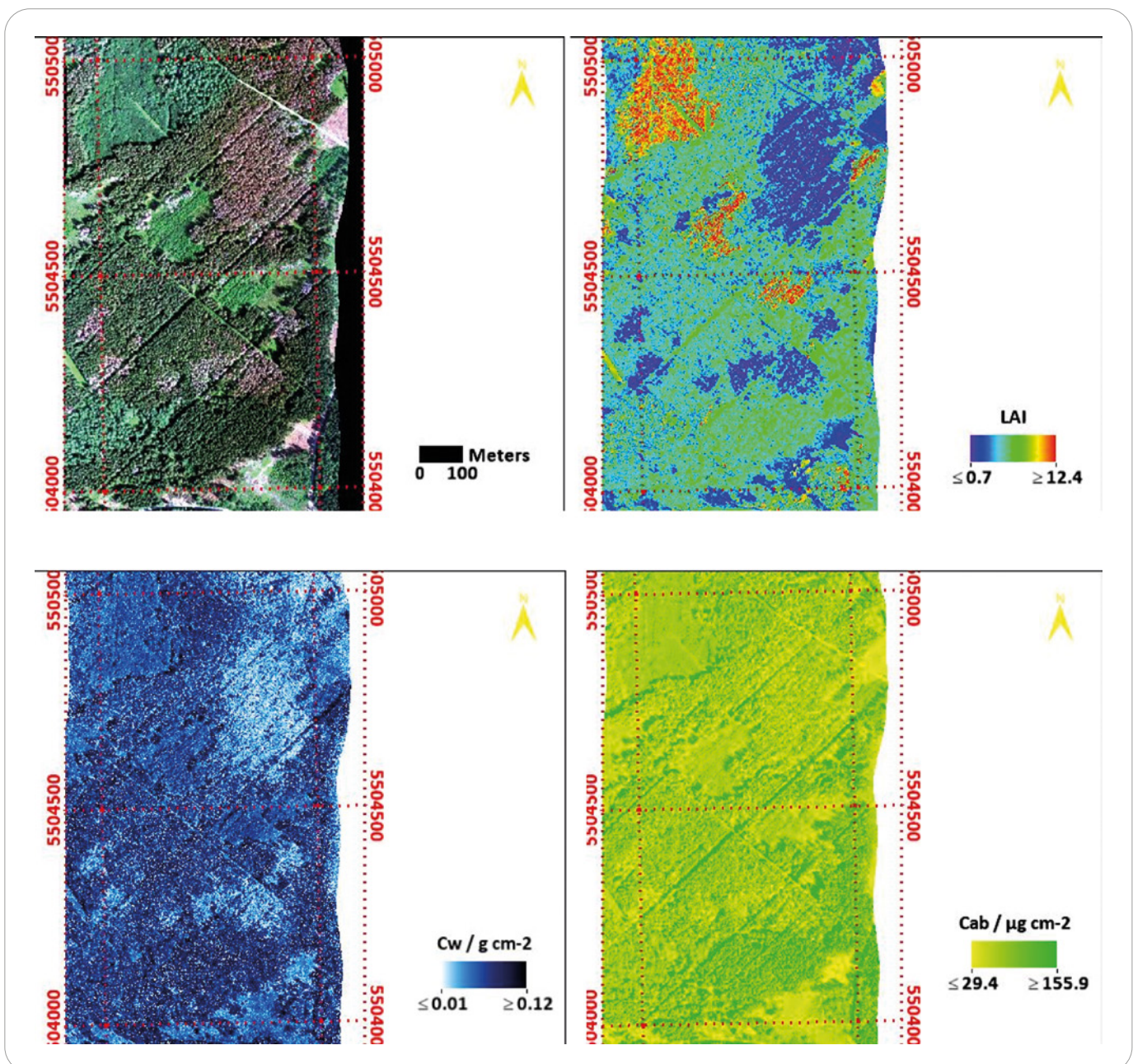


Abb. 6: Über Modellinversion abgeleitete Karten des Blattflächenindex LAI, des Bestandwassergehalts Cw und des Gesamtchlorophyllgehalts Cab sowie der Hyperspektraldatensatz in Echtfarbdarstellung (oben links).



Unterschiede erzeugen bei der Anwendung dieses Modells auf die Bilddaten per Invertierung entsprechende Parameterkarten, in denen der Schädigungsgrad in der Fläche erkennbar wird. Somit kann die Forschung zu einem besseren Verständnis darüber beitragen, wie Pflanzeigenschaften sich während des grünen Angriffsstadiums des Borkenkäfers verändern und so zur Entwicklung von Frühwarnsystemen beitragen. Maßnahmen im Randbereich des Nationalparks können so effektiver erfolgen und die Ausbreitung von Borkenkäfern auf umliegende Wälder besser vermieden werden.

## Danksagung

Wir möchten der Europäischen Weltraumorganisation ESA und der Universität Zürich für die Durchführung der Flugkampagne und die Bereitstellung der Hyperspektraldaten unseren Dank aussprechen. Ein besonderer Dank gebührt auch den Rangern, die uns bei unserer Geländearbeit im Nationalpark unterstützt haben.

## Im Überblick

- Hyperspektrale Aufnahmesysteme sind ein leistungsstarkes Werkzeug in wissenschaftlichen Untersuchungen und Anwendungen, in denen genaue Materialanalysen und Identifikationen von entscheidender Bedeutung sind.
- Flugzeuggestützte hyperspektrale Fernerkundungsdaten mit ihrer hohen spektralen und räumlichen Auflösung sind entscheidende Datensätze für die Grundlagenforschung im Bereich forstlicher Fragestellungen.
- Der Nationalpark Hunsrück-Hochwald bietet sich als ideales Freiluftlabor für aktuelle Forschungen an, da die dynamischen Veränderungen im Wald die Beobachtung verschiedener Zustände ermöglichen.
- Die Analyse der erhobenen Hyperspektraldaten zeigt Zusammenhänge zwischen Borkenkäferschäden und gemessenen Reflexionsignalen.



## Die Autoren

Dr. Martin Schlerf ist Senior Scientist in Remote Sensing am LIST. Er koordiniert Projekte zur Analyse hyperspektraler und thermaler Fernerkundungsdaten und berät die ESA in der CHIME-Mission.

Dr. Johannes Stoffels ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fach Umweltfernerkundung und Geoinformatik an der Universität Trier. Er beschäftigt sich mit der Analyse und Auswertung von Fernerkundungsdaten für forstliche Fragestellungen.

Dr. Jan Rommelfanger ist Leiter der Abteilung Umweltbildung, Naturerleben, Regionalentwicklung im Nationalpark Hunsrück-Hochwald. Er beschäftigt sich mit dem Transfer von Wissen und Erkenntnissen aus der Beobachtung natürlicher Abläufe im Nationalpark.

Dr. Henning Buddenbaum ist wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fach Umweltfernerkundung und Geoinformatik sowie Geschäftsführer des Research Institute for Applied Geoinformatics an der Universität Trier.

Dr. Achim Röder ist akademischer Direktor im Fach Umweltfernerkundung und Geoinformatik an der Universität Trier. Er beschäftigt sich mit der Auswertung multi- und hyperspektraler Fernerkundungsdaten für Umweltfragestellungen.

Christian Bossung ist Umweltwissenschaftler und arbeitet am LIST mit Schwerpunkt Fernerkundung für landwirtschaftliche und forstliche Anwendungen.

Prof. Dr. Thomas Udelhoven ist Fachleiter der Arbeitsgruppe Umweltfernerkundung und Geoinformatik an der Universität Trier. Seine Forschungsschwerpunkte liegen im Bereich Monitoring und Modellierung raumzeitlicher Prozesse der Geo- und Biosphäre durch integrierte Nutzung von Geo-, Fernerkundungsdaten und geostatistischer Methoden.



## Quellen

- Abdullah, H., Skidmore, A.K., Darvishzadeh, R., Heurich, M., 2019.** Sentinel-2 accurately maps green-attack stage of European spruce bark beetle (*Ips typographus*, L.) compared with Landsat-8. *Remote Sens. Ecol. Conserv.* 5, 87–106. <https://doi.org/10.1002/rse2.93>
- Atzberger, C., 2000.** Development of an invertible forest reflectance model: The INFOR-model. *Decade Trans-Eur. Remote Sens. Coop.* 39–44.
- Bárta, V., Lukeš, P., Homolová, L., 2021.** Early detection of bark beetle infestation in Norway spruce forests of Central Europe using Sentinel-2. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation* 100, 102335. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2021.102335>
- 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, 6–36. <https://doi.org/10.1109/MGRS.2013.2244672>
- BMEL, B. für E. und L. (BMEL) R. 515 – N.W., Holzmarkt, 2023.** Massive Schäden – Einsatz für die Wälder [WWW Document]. *Wald Dtschl.* URL <https://www.bmel.de/DE/themen/wald/wald-in-deutschland/wald-trockenheit-klimawandel.html> (Aufruf am 22.09.23).
- Darvishzadeh, R., Skidmore, A., Schlerf, M., Atzberger, C., 2008.** Inversion of a radiative transfer model for estimating vegetation LAI and chlorophyll in a heterogeneous grassland. *Remote Sens. Environ., Earth Observations for Terrestrial Biodiversity and Ecosystems Special Issue* 112, 2592–2604. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2007.12.003>
- Fettig, C.J., Egan, J.M., Delb, H., Hilszczański, J., Kautz, M., Munson, A.S., Nowak, J.T., Negrón, J.F., 2022.** 11 – Management tactics to reduce bark beetle impacts in North America and Europe under altered forest and climatic conditions, in: Gandhi, K.J.K., Hofstetter, R.W. (Eds.), *Bark Beetle Management, Ecology, and Climate Change*. Academic Press, pp. 345–394. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822145-7.00006-4>
- Hoch, G., Schopf, A., Weizer, G., Netherer, S., Schebeck, M., Kirisits, T., Baier, P., Wegensteiner, R., 2020.** *Der Buchdrucker: Biologie, Ökologie, Management*, 2. Auflage. ed.
- Jacquemoud, S., Bacour, C., Poilvé, H., Frangi, J.-P., 2000.** Comparison of Four Radiative Transfer Models to Simulate Plant Canopies Reflectance: Direct and Inverse Mode. *Remote Sens. Environ.* 74, 471–481. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(00\)00139-5](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(00)00139-5)
- Jacquemoud, S., Verhoef, W., Baret, F., Bacour, C., Zarco-Tejada, P.J., Asner, G.P., François, C., Ustin, S.L., 2009.** PROSPECT+SAIL models: A review of use for vegetation characterization. *Remote Sens. Environ., Imaging Spectroscopy Special Issue* 113, S56–S66. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.01.026>
- Mandl, L., Lang, S., 2023.** Uncovering Early Traces of Bark Beetle Induced Forest Stress via Semantically Enriched Sentinel-2 Data and Spectral Indices. *PFG – J. Photogramm. Remote Sens. Geoinformation Sci.* 91, 211–231. <https://doi.org/10.1007/s41064-023-00240-4>
- Müller, J., Bußler, H., Goßner, M., Rettelbach, T., Duelli, P., 2008.** The European spruce bark beetle *Ips typographus* in a national park: from pest to keystone species. *Biodivers. Conserv.* 17, 2979–3001. <https://doi.org/10.1007/s10531-008-9409-1>
- Nierhaus-Wunderwald, D., 2004.** *Biologie der Buchdruckerarten* [WWW Document]. URL <https://www.waldwissen.net/de/lebensraum-wald/tiere-im-wald/insekten-wirbellose/biologie-der-buchdruckerarten>
- Rast, M., Nieke, J., Adams, J., Isola, C., Gascon, F., 2021.** Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment (Chime). <https://doi.org/10.1109/IGARSS47720.2021.9553319>
- Schlerf, M., Atzberger, C., 2012.** Vegetation Structure Retrieval in Beech and Spruce Forests Using Spectrodirectional Satellite Data. *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Obs. Remote Sens.* 5, 8–17. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2012.2184268>
- Schlerf, M., Atzberger, C., 2006.** Inversion of a forest reflectance model to estimate structural canopy variables from hyperspectral remote sensing data. *Remote Sens. Environ.* 100, 281–294. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2005.10.006>
- Verrelst, J., Rivera Caicedo, J.P., Servera, J.V., Belda, S., n.d.** ARTMO – Automated Radiative Transfer Models Operator [WWW Document]. <https://artmtoolbox.com> (accessed 11.13.23)

Nationalpark  
Hunsrück-Hochwald

