

Aus der Luft erkannt: Präzise Schaderfassung in Laubwäldern

Johannes Jurgovsky, Christoph Straub, Rudolf Seitz

Technische Fortschritte in der Fernerkundung liefern immer detailliertere Daten der Erdoberfläche. Dies kann auch die Erfassung und Dokumentation von Schäden im Wald verbessern. Zudem eröffnen KI-Algorithmen neue Möglichkeiten für die automatisierte Auswertung dieser Daten. Aktuell untersucht die LWF im Forschungsprojekt »AirLaserSpec« einen innovativen Ansatz zur Erfassung von Laubholzschäden, bei dem 3D-Lasermessungen mit Multispektralaufnahmen kombiniert werden.

Seit 2019 wurden in Buchenbeständen in Nordbayern deutliche Schäden beobachtet, was auf die massive Trockenheit der vorangegangenen Jahre zurückgeführt wird. Festgestellt wurden ein vorzeitiger Laubabfall, vertrocknete Kronenteile und absterbende Bäume. Obwohl die Wasserversorgung für das Jahr 2024 vergleichsweise besser war, wird vermutet, dass die trockenen und heißen Sommer der zurückliegenden Jahre vermutlich auch

weiterhin einen Einfluss auf die Vitalität der Bäume haben (Heym et al. 2025). Um diese Phänomene auf großer Fläche erfassen und analysieren zu können, werden im Forschungsprojekt AirLaserSpec der LWF moderne Fernerkundungstechniken getestet. Falls die Erprobung erfolgreich verläuft, könnten so Geodaten mit der exakten räumlichen Lage der Schadflächen sowie Hinweise zum regionalen Schadensausmaß geliefert werden. Für

die Untersuchungen wurden die Gebiete Waldbrunn (im Forstbetrieb Arnstein, 45 km²) und Ebrach (im Forstbetrieb Ebrach, 50 km²) mit einem hohen Buchenanteil von ca. 50% und unterschiedlich stark ausgeprägten Kronenschäden ausgewählt. Abbildung 1 zeigt beispielhaft eine fast vollständig entlaubte Buchenkrone sowie eine Buche mit einer abgestorbenen Oberkrone. Diese typischen Schadmerkmale wurden bei Feldaufnahmen am 16. September 2023 fotografiert.

Fernerkundung zur Erfassung geschädigter Buchen

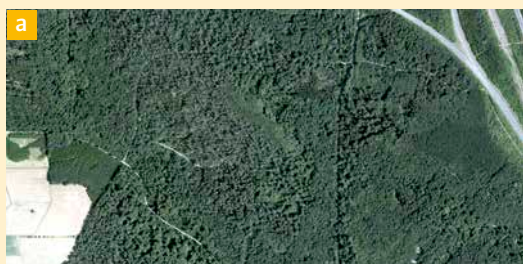
Laubholzschäden können mittels Fernerkundung zum einen über spektrale Reflexionsunterschiede zwischen geschädigten und vitalen Kronen identifiziert werden und zum anderen über Veränderungen in der Höhenstruktur der betroffenen Baumkronen. Im Forschungsprojekt »AirLaserSpec« werden Luftbilder einer Multispektralkamera mit Lasermessungen kombiniert, um zusätzlich zu den Stereo-Luftbilddaten simultan präzise Höhenmessungen zu erhalten. Vor der weiteren Verarbeitung wurden zunächst aus den Stereo-Bildern sowohl Echtfarben- als auch Color-Infrarot-Orthophotos mit einer sehr hohen räumlichen Auflösung von 0,1 m berechnet (Abbildungen 2a und 2b).

Die derzeit genaueste fernerkundliche Technik zur Höhenmessung ist die Laserscanermessung, welche häufig auch als LiDAR (Light Detection and Ranging) Technologie bezeichnet wird. Ein LiDAR-System sendet Laserlichtpulse aus und misst die Laufzeit der reflektierten Signale, um daraus die Entfernung zu berechnen. Wird diese Technik in einem Flugzeug eingebaut, können damit präzise 3D-Punktwolken der beflogenen Landschaft gewonnen werden. Bei den Befliegungen für AirLaserSpec wurden im Mittel ca. 40 Laserpunkte pro m² gemessen. Auf Grundlage einer solchen Punktwolke können mit geeigneten Algorithmen sowohl hochaufgelöste Oberflächenmodelle inklusive Vegetation und Bebauung als auch Geländemodelle des Bodens unterhalb der Vegetation berechnet werden (Abbildungen 2c und 2d).



1 Typische Schäden an Buchenkronen im Projektgebiet Ebrach.
Fotos: Johannes Jurgovsky

Echtfarben-Orthophoto



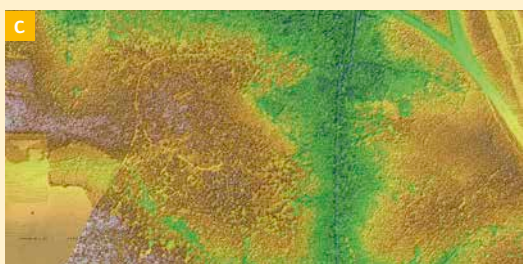
Bandkombination: Rot, Grün, Blau

Color-Infrarot-Orthophoto

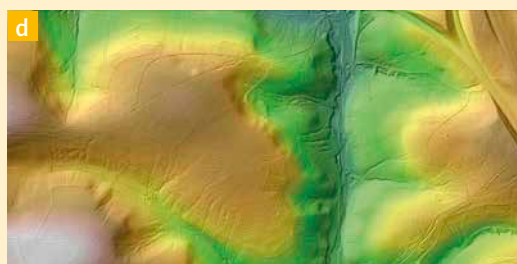


Bandkombination: Nahes Infrarot, Rot, Grün

Digitales Oberflächenmodell

Höhe 270  370 m

Digitales Geländemodell



0 250 500 m

2 Eine Flugzeug-befliegung mit Multi-spektralkamera und Laserscanner liefert neben hochaufgelösten Bildinformationen auch präzise Höhen-daten. Dargestellt ist ein Ausschnitt der Untersuchungsfläche Waldbrunn.

Wie funktioniert die automatisierte Datenauswertung?

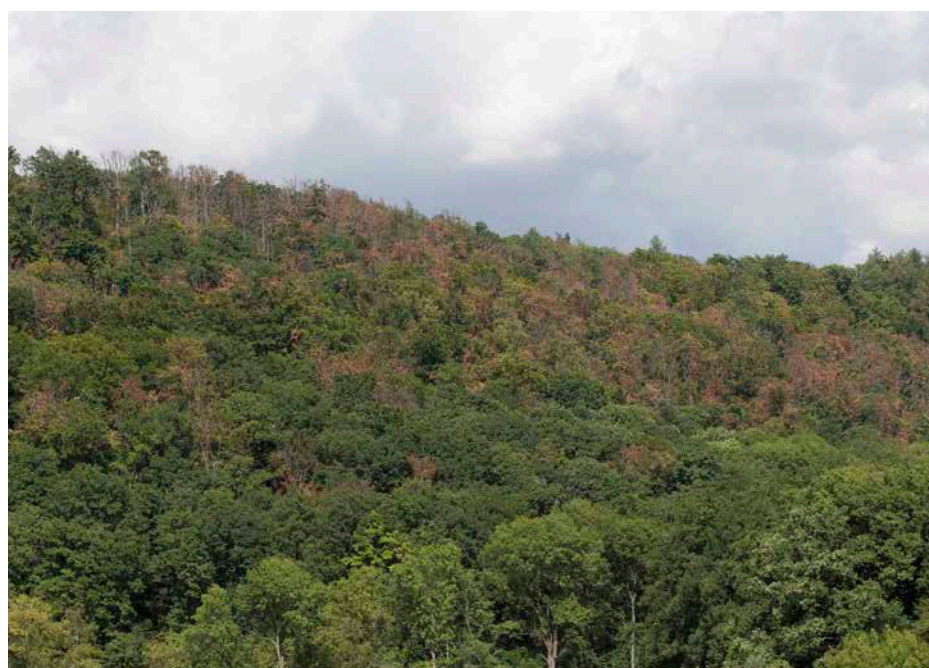
Um zukünftig große Datenmengen effizient auswerten zu können, wird in AirLaserSpec der Einsatz von Verfahren aus dem Bereich des maschinellen Lernens, insbesondere Deep Learning, getestet. Hierzu müssen die Fernerkundungsdaten zunächst für die Auswertung vorbereitet und Trainingsdaten erstellt werden. Auf Grundlage der Trainingsdaten soll das computergestützte Verfahren lernen, wie die Spektralinformation der Luftbilder oder die Verteilung der Lasermesspunkte im Raum mit der Zielgröße (hier: verfärbte und entlaubte Baumkronen) zusammenhängen. Je umfassender die Variation von Kronenschäden in Form von Trainingsbeispielen erfasst werden kann, umso mehr geschädigte Kronen können anschließend von einem Modell auch korrekt erkannt werden. Dazu wurden die Bilddaten von mehreren Luftbildinterpreten am Bildschirm analysiert. Zur Unterstützung und Erleichterung der visuellen Interpretation wurde zu Beginn eine Anleitung mit zahlreichen Bildbeispielen erarbeitet. Mit spezieller Hard- und Software wurden die Luftbilder zusätzlich stereoskopisch bzw. dreidimensional betrachtet. Im Vergleich zur reinen 2D Analyse im GIS, können geschädigte Bäume am 3D-Monitor noch

zuverlässiger erkannt werden. Insgesamt konnten so 10.007 geschädigte Laubholzkronen optisch erfasst und im GIS digitalisiert werden.

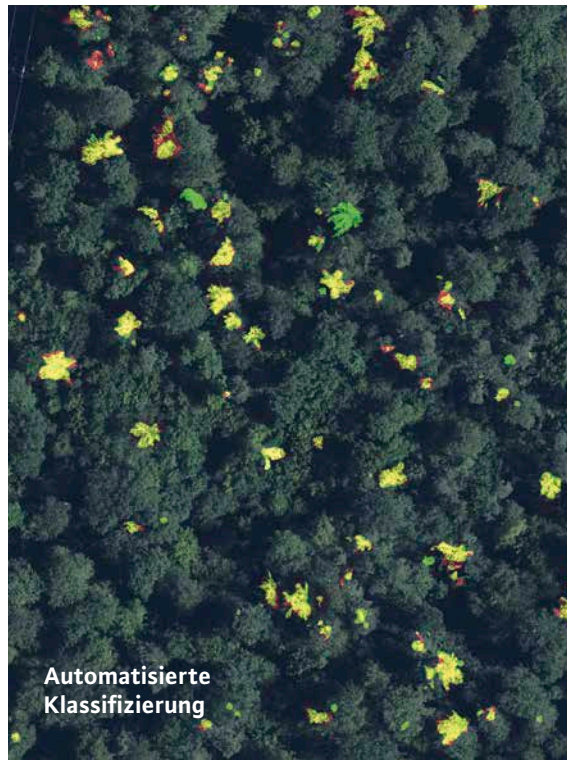
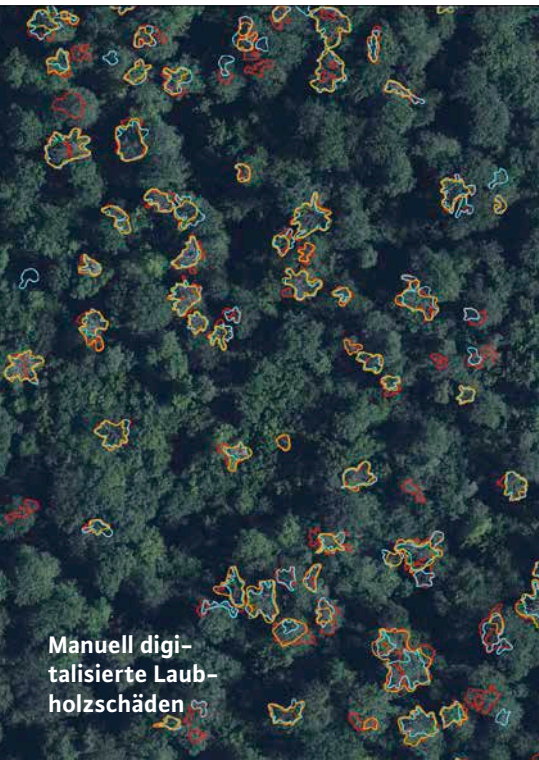
Unterschiede in der Bildinterpretation

Es zeigte sich, dass die visuelle Beurteilung, ob ein Bildbereich gerade noch oder eben nicht mehr als geschädigt eingestuft wird, immer wieder eine Herausforderung

darstellt. Der Übergang zwischen diesen beiden Kategorien erscheint oftmals fließend. Dadurch ist die Schadfächenerfassung unterschiedlicher Luftbildinterpreten in der Regel nicht deckungsgleich. Um diese Unschärfe in den Trainingsdaten zu quantifizieren, wurde eine kleine Testfläche mit einer Größe von 3,4 ha ausgewählt. In dieser Testfläche digitalisierten vier Luftbildinterpreten unabhängig von-



3 Trockenschäden in unterfränkischen Laubwäldern. Foto: Stephan Thierfelder, AELF Schweinfurth



4 links: Dargestellt ist eine Testfläche aus dem Projektgebiet Ebrach. Vier Luftbildinterpreten haben hier geschädigte Laubholzkronen auf der Grundlage der Orthophotos abgegrenzt. Deutlich erkennbar sind die Abweichungen in den Ergebnissen, insbesondere im Randbereich der Polygone.
rechts: Klassifizierungsergebnis des Deep Learning Verfahrens U-Net für dieselbe Testfläche. Das U-Net wurde hier auf die originären Orthophotos mit einer räumlichen Auflösung von 0,1 m x 0,1 m angewendet.

- Luftbildinterpret 1
- Luftbildinterpret 2
- Luftbildinterpret 3
- Luftbildinterpret 4
- Korrekt erkannter Schadbereich
- Nicht erkannter Schadbereich
- Fälschlicherweise als Schaden erkannter Bereich

einander die geschädigten Kronenbereiche (Abbildung 4, links). Als Kennzahl zur Bewertung der Übereinstimmung der resultierenden Trainingspolygone wurde die sogenannte Intersection over Union (IoU) berechnet. Eine Erklärung zur Berechnung und Beurteilung der IoU findet sich in der *Infobox*. Im Mittel zeigten die manuell abgegrenzten Schadflächen der vier Interpreten eine IoU von 0,55. Die größten Abweichungen wurden vor allem an den Randbereichen der Polygone festgestellt, was auch in der Veröffentlichung von Joshi & Witharana (2025) beschrieben wird.

Automatisierte Klassifikation geschädigter Laubholzkronen

Mit den oben beschriebenen Trainingsdaten wurde das etablierte Klassifikationsverfahren U-Net (Ronneberger et al., 2015) aus der Gruppe der Deep Learning Verfahren trainiert und validiert (Abbildung 5). U-Net ist ein vergleichsweise einfaches Deep Learning-Verfahren. Es findet jedoch seit Jahren breite Anwendung in der fernerkundlichen Klassifikation und liefert trotz seiner einfachen Struktur zuverlässig gute Ergebnisse. Als Eingangsdaten in die Klassifikation dienten die Color-Infrarot-Orthophotos von dem Projektgebiet Ebrach. Um den Einfluss der räumlichen Auflösung der Eingangsdaten auf das Klassifikationsergebnis zu prüfen, wurde für das U-Net-Ver-

fahren sowohl eine reduzierte Auflösung von 1 m x 1 m Pixelgröße als auch die originäre Auflösung der Bilddaten von 0,1 m x 0,1 m erprobt. Als Kennzahl zur Bewertung der Übereinstimmung zwischen automatisierter Klassifizierung und manueller Referenz wurde wieder die Intersection over Union berechnet.

Basierend auf den originären Orthophotos mit 0,1 m x 0,1 m Auflösung erzielte das U-Net Verfahren einen IoU-Wert von 0,606. Dies entspricht ungefähr der Übereinstimmung, welche die vier Luftbildinterpreten im Mittel auf der Testfläche erzielten. Selbst bei reduzierter Auflösung erreicht das U-Net-Verfahren noch einen guten IoU-Wert von 0.534. Zukünftige LiDAR-basierte Auswerteverfahren müssen sich an dieser Genauigkeit messen lassen, da ihre maximale Auflösung wegen der Punktdichte der Lasermessungen ebenfalls auf 1 m x 1 m begrenzt sein wird (siehe Fortführung und Anwendungspotenzial). Abbildung 4, rechts zeigt die Anwendung dieses U-Net-Modells auf die Testfläche aus dem Projektgebiet Ebrach. Neben U-Net bietet die Gruppe der Deep Learning-Verfahren eine Vielzahl weiterer Ansätze, die zwar in gleicher Weise auf die Fragestellung anwendbar sind, jedoch eine wesentlich komplexere und damit rechenintensivere Struktur aufweisen. Da all diese Verfahren die Abgrenzung von Kronentotholz aus Trainings-

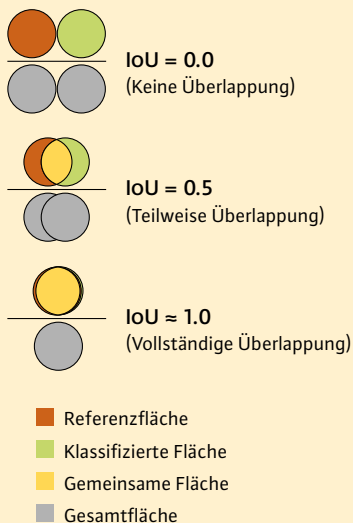
daten erlernen, können solche Verfahren auch nur diejenige mittlere Genauigkeit erreichen, die von Luftbildinterpreten im Mittel vorgegeben wird. Die Beobachtung, dass selbst das vergleichsweise einfache U-Net der Klassifikationsgenauigkeit von Luftbildinterpreten nahekammt, deutet darauf hin, dass die Erkennungsgenauigkeit nicht durch das verwendete Verfahren limitiert ist. Vielmehr entscheidet die eindeutige Abgrenzbarkeit der betrachteten Klassen und die Qualität der Trainingsdaten darüber, welche maximale Genauigkeit erzielt werden kann.

Fortführung und Anwendungspotenzial

In bisherigen Auswertungen wurde Kronentotholz auf Grundlage der Spektralinformationen in Bilddaten automatisiert klassifiziert. Zusätzlich wurden Hinweise auf die maximal möglichen Erkennungsgenauigkeiten gesammelt. Ein Alleinstellungsmerkmal des Projektes AirLaserSpec ist die Verfügbarkeit von Lasermessungen, die auf der gesamten Projektfläche zeitgleich mit den Bilddaten aufgezeichnet wurden. Die ausgesendeten Laserpulse werden auf ihrem Weg durch eine Baumkrone von Hindernissen reflektiert und liefern so Informationen über die Geometrie der Krone. Da die Laserpulse das Blätterdach dichter, vitaler Laubbäume kaum durchdringen können, häufen sich die ersten Reflexionen an der Vegetationsober-

Intersection over Union

Die IoU misst wie gut die Flächen von zwei verschiedenen Datensätzen übereinstimmen (Abbildung 4). Ein hoher IoU-Wert (näher an 1) bedeutet, dass die Übereinstimmung sehr gut ist, während ein niedriger Wert (näher an 0) bedeutet, dass die Übereinstimmung eher schlecht ist.



fläche. Kaum Hindernisse gibt es dagegen bei entlaubten Kronen. Im Ergebnis verteilen sich die ersten Reflexionen deshalb gleichmäßiger über den gesamten Kronenraum. Die Anordnung der Lasermessungen im Raum kann somit wertvolle Hinweise zur Trennung von belaubten und entlaubten Baumkronen liefern. In einem nächsten Schritt soll geprüft werden, wie die Spektraldaten mit den Lasermessungen kombiniert werden können und ob die Kombination beider Datengrundlagen die Kronentotholzerkennung verbessert.



6 Automatisch detektiertes Kronentotholz im Projektgebiet. Jeder rote Punkt markiert einen Baum, der automatisch als geschädigt erkannt wurde.

Klassifikationsverfahren	Pixelgröße der verwendeten Color-Infrarot Orthophotos	Übereinstimmung zwischen automatisierter und manueller Klassifizierung: Intersection over Union (IoU)
U-Net	1 m × 1 m	0.534 ± 0.073
U-Net	0,1 m × 0,1 m	0.606 ± 0.092

5 Ergebnisse des automatisierten Klassifizierungsverfahrens zur Erfassung geschädigter Laubholzkronen.

Mit einem automatisierten Verfahren zur Schadklassifikation könnten große Waldflächen in kürzester Zeit analysiert und bewertet werden. Das Ergebnis der Analyse könnte anschließend beispielsweise in Form einer Schädigungskarte über ein Geoinformationssystem wie BayWIS an die Forstpraktiker ausgespielt werden. Eine notwendige Voraussetzung für die Akzeptanz derartiger digitaler Produkte ist jedoch ihre Zuverlässigkeit. Nur so kann das Vertrauen der Nutzerinnen und Nutzer in die digitale Erfassung gestärkt werden. Im konkreten Fall bedeutet das: Auch über unterschiedlichste Waldflä-

chen hinweg müssen die automatisiert vorgenommenen Klassifikationen plausibel sein und eine hohe, vorhersehbare Qualität aufweisen. In der Realität stammen Luftbilddaten zu größeren Waldgebieten jedoch aus unterschiedlichen Befliegungen. Da ein automatisiertes Verfahren stets auf einer bestimmten Datengrundlage trainiert wird, können bei der Übertragung auf andere Waldgebiete erhebliche, vor allem aber unvorhersehbare Genauigkeitsverluste auftreten. Das Projekt AirLaserSpec prüft deshalb auch, wie gut sich die verwendeten Verfahren auf andere Waldgebiete übertragen lassen.

Zusammenfassung

Das Forschungsprojekt AirLaserSpec der LWF befasst sich mit innovativen Techniken und der Erfassung von Schäden an Laubholz sowie der Analyse von Bewuchs in Bestandeslücken. Dafür wurden Flugzeugbefliegungen mit Laserscanning-Technologie und Multispektralkamera in zwei ausgewählten Gebieten in Nordbayern durchgeführt. Derzeit entwickelt die LWF automatisierte Auswerteverfahren, die auf maschinellem Lernen basieren. Für das Training der Algorithmen wurden insgesamt über 10.000 geschädigte Laubholzkronen manuell von mehreren Luftbildinterpreten digitalisiert. Die bisher besten Ergebnisse in der Klassifikationsgenauigkeit wurden mithilfe eines etablierten U-Net-Verfahrens erzielt, das auf Color-Infrarot-Bilddaten basiert. In zukünftigen Arbeiten wird die zusätzliche Nutzung der Lasermessungen zur Schaderfassung untersucht und die Übertragbarkeit der entwickelten Modelle auf verschiedene Datensätze geprüft. Ziel des Projektes ist es, präzise Informationen über Schäden in Laubholzbeständen für die Forstpraxis zu liefern.

Projekt

Das Projekt »AirLaserSpec« wird vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft, Forsten und Tourismus (StMELF) finanziert (Laufzeit: 01.10.2023–30.11.2027).

Autoren

Dr. Johannes Jurgovsky und Dr. Christoph Straub arbeiten im Fachbereich Fernerkundung in der Abteilung »Fernerkundung und Informationstechnologie« der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft. Rudolf Seitz leitet diese Abteilung.
Kontakt: Christoph.Straub@lwf.bayern.de

Link

<https://www.lwf.bayern.de/informationstechnologie/fernerkundung/370859/index.php>