

© G. Grendörffer

2022 | Görres Grendörffer

# Grundlagen der landwirtschaftlichen Fernerkundung

## Inhalt

1	Einleitung.....	3
2	Grundlagen der landwirtschaftlichen Fernerkundung.....	3
3	Vegetationsindizes und Multispektralaufnahmen.....	5
4	Aufnahmezeitpunkte und das richtige Timing .....	9
5	Auf den Maßstab kommt es an.....	12
	Literatur .....	15
	Autor .....	15

## 1 Einleitung

Ist der Boden zu nass? Sind Krankheits- oder Distelnester im Bestand? Leiden Pflanzen an Nährstoffmangel? Mit ihren Sensoren bieten Drohnenkameras nicht nur einen anderen Blickwinkel auf die Bestände, sie können auch für das menschliche Auge sonst verborgene Zeichen sichtbar machen. Das liegt vor allem am Absorptions- und Reflexionsverhalten der Pflanzen – Stress ändert das Spektralverhalten signifikant. Wie die Sensoren die Unterschiede erfassen und wie sich daraus Vegetationsindizes ermitteln lassen, verrät dieser Beitrag. Zudem geht er darauf ein, wie der richtige Aufnahmezeitpunkt bestimmt und der richtige Maßstab ausgewählt wird.

Dr.-Ing. Görres Grenzdörffer ist Wissenschaftler an der Professur für Geodäsie und Geoinformatik der Universität Rostock. Er ist zugleich ein Leiter des Steinbeis Transferzentrums Geoinformatik und hat den Beitrag für das KTBL-Arbeitsprogramm „Kalkulationsunterlagen“ (AP KU) im Auftrag des Bundes und der Länder erstellt. Der Beitrag ist ein kostenloser Auszug aus der 2022 erschienenen KTBL-Schrift „Drohnen in der Landwirtschaft – Übersicht und Potenzial“.

## 2 Grundlagen der landwirtschaftlichen Fernerkundung

Die Fernerkundung ist ein indirektes Verfahren, welches Unterschiede innerhalb eines Pflanzenbestands dokumentiert. Diese Unterschiede sind auf viele Ursachen zurückzuführen: z. B. auf die Heterogenität des Bodens, des Bestands, der Nährstoffversorgung, der Exposition, der Bewirtschaftung. Die Vielfalt möglicher Ursachen spektraler Unterschiede erschwert den Einsatz der Fernerkundung, da die Pflanzen – spektral gesehen – auf Stress unterschiedlicher Herkunft (z. B. Nährstoffmangel, Wassermangel, Pflanzenkrankheiten) oft recht ähnlich reagieren.

Aber der Reihe nach: Pflanzen weisen ein typisches Reflexionsverhalten auf, das sich im Laufe der phänologischen Entwicklung verändert. Zusätzlich können die Stickstoffversorgung und verschiedene Krankheiten das Reflexionsverhalten der Pflanzen beeinflussen.

Grüne und gesunde Blattorgane zeigen ein sehr typisches Reflexionsverhalten (Abb. 1). Der Reflexionsverlauf vitaler Vegetation lässt sich in drei Spektralbereiche unterteilen. Sie unterscheiden sich durch die jeweils dominierenden Strahlungstransportvorgänge, die wiederum an spezifische Bestandteile des Blatts gekoppelt sind (Jones und Vaughan 2010).

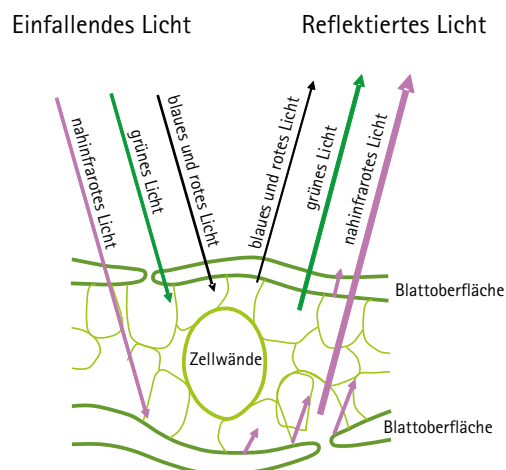


Abb. 1: Absorption und Reflexion an grünen Blättern (© G. Grenzdörffer)

- Im sichtbaren Licht (blau bis rot, 400 bis 700 nm) überwiegt die Absorption der Blattpigmente (Chlorophyll a und b, Carotinoide). Die Blattpigmente sind verantwortlich für die Photosynthese der Pflanzen. Da die Fotorezeptoren der Blattpigmente vornehmlich durch die Absorption der blauen und der roten Strahlung angeregt werden, resultiert ein relatives Reflexionsmaximum im grünen Wellenlängenbereich, weshalb die Pflanzen für das menschliche Auge grün erscheinen.
- Im nahen Infrarot (700 bis 1.300 nm) haben Absorptionen keinen wesentlichen Einfluss. Transmission, Streuung und Reflexion prägen diesen Wellenlängenbereich. Die Strahlung, die nicht direkt von der Blattoberfläche reflektiert wird, wird innerhalb des Blattes an zahlreichen Zellwänden diffus reflektiert. Der diffuse Charakter der Reflexion in diesem Wellenlängenbereich wird durch die interne Zellstruktur bestimmt. Dabei besteht eine enge Beziehung zwischen der Blattreflexion und der Anzahl der luftgefüllten Hohlräume im Blattgewebe. Da die Orientierung der Zellwände im Schwammparenchym eines Blattes zufällig verteilt ist und zahlreiche Grenzschichten zwischen der Zellsubstanz und den luftgefüllten Interzellularen vorhanden sind, erfolgt die Streuung des Lichts in erster Linie im Schwammparenchym. Die Rolle des Palisadenparenchyms ist dagegen von geringer Bedeutung. Zweikeimblättrige Pflanzen reflektieren stärker als einkeimblättrige Pflanzen, da deren Schwammparenchym weniger kompakt ist und zahlreiche Lufteinschlüsse aufweist.
- Im mittleren Infrarot (1.300 bis 2.500 nm) dominiert die Absorption, die in diesem Wellenlängenbereich primär durch das Sichtbare in den Zellen vorhandene Wasser verursacht wird.

Unter Stress ändert sich das Spektralverhalten von Pflanzen signifikant, was man sich bei der Analyse von Vegetationsschäden aller Art zunutze macht (Abb. 2).

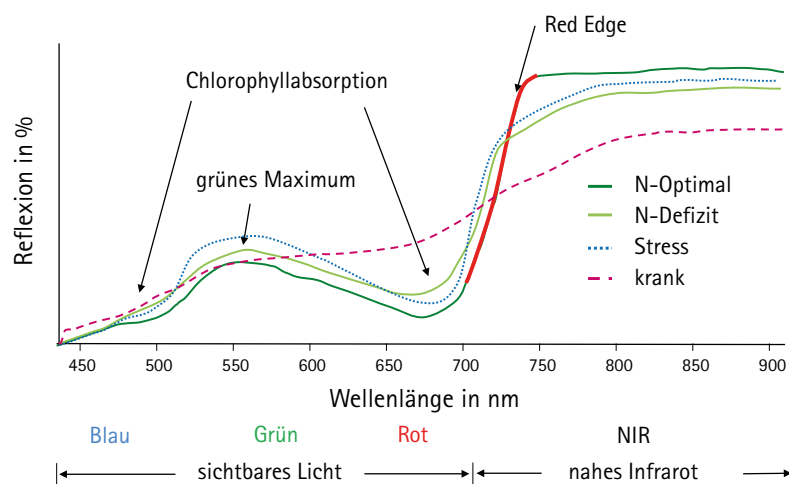


Abb. 2: Spektrale Reflexion gesunder, kranker und Stickstoff unterversorgter Vegetation am Beispiel von Winterweizen. Als „Red Edge“ wird der steile Anstieg zwischen der Pflanzenreflexion zwischen dem grünen und dem roten Wellenlängenbereich bezeichnet. (© G. Grenzdörffer)

Bei Schädigung oder Alterung von Blättern nimmt die Vegetation im roten Wellenlängenbereich zu, denn die verringerte Photosynthese führt zu einem Rückgang von Chlorophyll und der damit verbundenen Reduktion der Absorption. Bei Wasserstress oder Schädigung des Zellgewebes nimmt die Reflexion im nahen Infrarot ab. Im mittleren Infrarot kommt es gleichzeitig zu einer Erhöhung der Reflexion, da die Wasserabsorption

onsbanden bei Austrocknung zurückgehen. Bei Kulturpflanzen wirkt sich Nährstoffmangel in der Regel auf den Chlorophyllgehalt der Pflanzen aus. Das führt z.B. bei einem Stickstoffmangel zu einer Erhöhung der Reflexion im sichtbaren Bereich und einer Verringerung der Reflexion im nahen Infrarot, da sich durch den Nährstoffmangel weniger Biomasse entwickelt hat. Diese Zusammenhänge können z.B. für die Düngung genutzt werden. Chlorosen und anderer Stress können das Reflexionsverhalten in ähnlicher Weise beeinflussen und bei einer sensorbasierten Düngung, egal ob mit Traktor, Drohne oder Satellit, zu Problemen führen.

Die bisher geschilderten Zusammenhänge auf der Blattebene lassen sich jedoch nicht einfach auf die Bestandsebene, d.h. die Reflexion einer Fläche, übertragen, wie sie von einer Drohne aus aufgenommen wird. Vielmehr setzt sich das Reflexionsverhalten eines Bestands aus mehreren Komponenten (z.B. Blätter, Stängel, Boden, Schatten) zusammen. Hinzu kommen die Ausrichtung und Größe der Pflanzen, die Bestandsdichte und die vertikale Gliederung eines Bestands.

Eine Besonderheit der Reflexion von Pflanzenbeständen ist die Tatsache, dass diese einen typischen jahreszeitlichen Verlauf aufweist (Abb. 3). Vereinfacht gesagt, setzt sich das Reflexionsspektrum eines Pflanzenbestands aus einem Boden- und einem Pflanzenanteil zusammen. Zu Beginn der Vegetationsperiode überwiegt das Bodensignal, das im Laufe der Vegetationsperiode immer weiter zurückgedrängt und durch die eigentliche Reflexion der Vegetation ersetzt wird. Zum Ende der Vegetationsperiode, wenn die Pflanzen abreifen, verändert sich das Reflexionsverhalten abermals und das Bodensignal dominiert wieder.

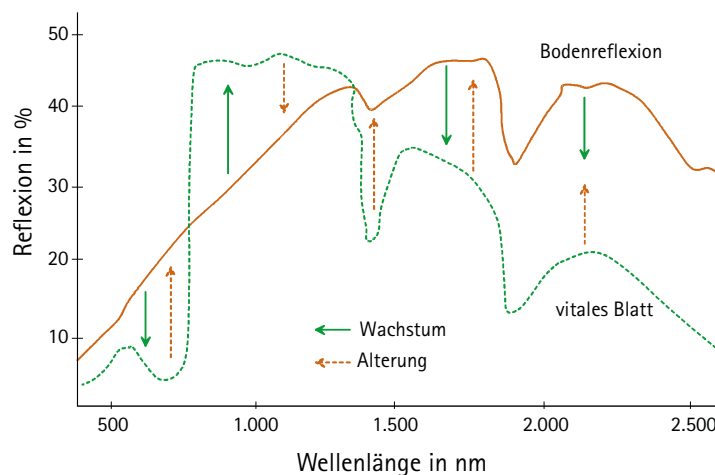


Abb. 3: Schematischer Verlauf der Reflexionseigenschaften eines Pflanzenbestands im Verhältnis zur Bodenreflexion während einer Vegetationsperiode (© G. Grenzdörffer)

### 3 Vegetationsindizes und Multispektralaufnahmen

Vegetationsindizes, die sich aus den Verhältnissen der Reflexion unterschiedlicher Spektralbereiche errechnen, können das Reflexionsverhalten der Pflanzen in einem einzigen Wert zusammenzufassen. Die Mehrzahl der Vegetationsindizes nutzt den Reflexionsunterschied zwischen dem sichtbaren und dem nahen infraroten Spektralbereich. In der Drohnenfernerkundung werden Vegetationsindizes für zwei verschiedene Zwecke eingesetzt:

- Zur Trennung von Pflanzen und Boden, z.B. zur Berechnung des Bodenbedeckungsgrads und – weit wichtiger – zur Identifikation und Zählung von Einzelpflanzen. Hier wird das spezielle Reflexionsverhalten vitaler Pflanzen genutzt, das sich von allen anderen Objekten durch den Anstieg der Reflexion im nahen Infrarot unterscheidet.
- Zur Erfassung von Unterschieden in der Pflanzenvitalität, der Nährstoff- und Wasserversorgung usw. innerhalb eines Pflanzenbestands. Die meisten Indizes nutzen die besonderen Reflexionseigenschaften vitaler Vegetation, die im sichtbaren Licht insgesamt wenig reflektiert und im nahen Infrarot umso mehr. Grundsätzlich gilt dabei, je vitaler und je mehr Vegetation, desto größer sind die Unterschiede zwischen der roten und der nahinfraroten Reflexion. Auch verschiebt sich bei vitalen Pflanzen der „Red Edge“ in Richtung des nahen Infrarots (Abb. 3).

Vegetationsindizes haben gegenüber der Nutzung einzelner Spektralbänder noch einen weiteren Vorteil: Durch die Quotientenbildung ergibt sich eine Normierung, die topografische und atmosphärische Effekte deutlich verringert. In der Literatur findet sich eine Fülle von Vegetations- und Feuchteindizes mit unterschiedlichen Vor- und Nachteilen (Xue und Sue 2017). In der „Index DataBase“, einem Webangebot der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn (<https://www.indexdatabase.de/>), sind 261 verschiedene Vegetationsindizes für vegetationsbezogene Fragestellungen gelistet.

Der bekannteste Vegetationsindex ist der „normalisierte Differenzvegetationsindex“ (NDVI). Er berechnet sich aus nahinfrarotem (NIR) und rotem Licht (R) (Gl. 1).

$$\text{NDVI} = \frac{\text{NIR} - \text{R}}{\text{NIR} + \text{R}} \quad \text{Gl. 1}$$

Durch die Normalisierung können die NDVI-Werte nur zwischen -1 und +1 schwanken. In der Literatur zeigt der NDVI zu einer Fülle von Bestandsparametern (z.B. der Biomasse, der Bestandsvitalität, dem Stickstoffgehalt, der Wasserversorgung, dem Pflanzenstress, dem Ertrag) stark positive Korrelationen. Deswegen wird er gerne verwendet, schließlich scheint er immer zu passen. Allerdings bedeutet Korrelation leider nicht unbedingt Kausalität. Der NDVI bildet nämlich in erster Linie die Menge an fotosynthetisch aktiver, vitaler grüner Vegetation ab, da dies zu einer Erhöhung der an obiger Stelle besprochenen Grenzflächenreflexion im nahen Infrarot führt. Gleichzeitig absorbiert vitale Vegetation auch mehr rotes Licht durch ihre Blätter und reflektiert somit weniger Licht in diesem Wellenlängenbereich. Da viele Pflanzen zudem den Anteil der Bodenreflexion verringern, wird die Reflexion im roten Wellenlängenbereich weiter reduziert. Je vitaler die Vegetation, desto größer sind die Pflanzen in der Regel, desto mehr Blätter bzw. Biomasse haben sie auch. Im Allgemeinen ist bei vitaleren Pflanzen auch die Nährstoff- und Wasserversorgung besser. Im umgekehrten Fall führen z.B. eine schlechte Wasserversorgung, Nährstoffmangel und andere Stressfaktoren zu verringertem Wachstum. Man sieht also, dass häufig mehrere Parameter in die gleiche Richtung zeigen und somit der NDVI ein Summenparameter ist, der einen allgemeinen Einblick über die Pflanzenvitalität erlaubt. Er ist weniger geeignet, um gezielt einzelne Ursachen wie die Stickstoffversorgung zu identifizieren. Wenn die Ursachen für ein verringertes Wachstum hingegen bekannt sind, z.B. eine stark variierende Wasserhaltekapazität auf dem Schlag, kann der NDVI – zum richtigen Zeitpunkt aufgenommen – sehr gute Rückschlüsse auf diesen Parameter (Wasserversorgung) geben.

Ein Problem des NDVI ist, dass er je nach Kultur ab einem Blattflächenindex (Leaf Area Index, LAI) von 4 bis 6 in die Sättigung geht. Was bedeutet das? Vereinfacht gesagt, werden die Unterschiede in der Pflanzen-

vitalität und Biomasse nicht mehr über den NDVI-Index abgebildet, da sich die Index-Werte nahe dem Maximalwert von 1 bewegen. Das führt z. B. dazu, dass der NDVI für die Qualitätsdüngergabe bei Weizen keine sinnvollen Differenzierungen ermöglicht.

Für die Bestimmung der Pflanzenvitalität hat sich auch der „normalisierte Red-Edge-Differenzvegetationsindex“ (Normalized Difference Red Edge Index, NDRE) etabliert (Xie et al. 2018), (Gl. 2).

$$\text{NDRE} = \frac{\text{Red Edge} - R}{\text{Red Edge} + R} \quad \text{Gl. 2}$$

Im Unterschied zum NDVI korreliert der NDRE sehr gut mit dem Chlorophyllgehalt, auch in späteren Entwicklungsphasen. Aus diesem Grund ist der NDRE für die Bestimmung des relativen Stickstoffgehalts der Pflanzen bzw. der Pflanzenvitalität und der Biomasse besonders geeignet. Da der Index durch etwaige Bodenreflexionen stark beeinflusst werden kann, ist eine ausreichende Bodenbedeckung Voraussetzung.

Als dritter Index nutzt der „Enhanced Vegetation Index“ (EVI) nicht nur die Reflexion im roten und nahinfraroten Licht, sondern auch im blauen Bereich. Durch den blauen Kanal eliminiert der EVI atmosphärische Einflüsse – die bei Drohnen allerdings selten problematisch sind. Dadurch reduziert er den Bodeneinfluss und geht nicht so schnell in die Sättigung, was bei dichter oder hoher Biomasse für zuverlässigere Korrelationen sorgt. Neben nahinfrarotem (NIR) und rotem Licht (R) wird dabei blaues Licht berücksichtigt (B), wie Gleichung 3 zeigt.

$$\text{EVI} = 2,5 \cdot \frac{\text{NIR} - R}{\text{NIR} - (6 \cdot R) - (7 \cdot B) + 1} \quad \text{Gl. 3}$$

Alternativ können aus Farbluftbildern ebenfalls verschiedene Vegetationsindizes zur Differenzierung der Bestandsdichte bzw. Biomasse abgeleitet werden. Der „Visible Atmospherically Resistant Index“ (VARI) hat sich dabei als besonders geeignet herausgestellt (Gitelson et al. 2002). Die Formel (Gl. 4) zur Berechnung des VARI bezieht neben dem roten (R) und blauen (B) auch das grüne Licht (G) mit ein.

$$\text{VARI} = \frac{G - R}{G + R - B} \quad \text{Gl. 4}$$

Farbluftbilder sind in der Regel nicht radiometrisch, d. h. spektral kalibriert. Vielmehr macht die Kamera einen automatischen Weißabgleich, um die Farbwerte auszugleichen. Aus der von der Drohne in der Regel automatisch berechneten Kombination von Belichtungszeit, Blende und ISO-Wert ergibt sich die Helligkeit für das gesamte Bild. Das führt dazu, dass die Grauwerte der einzelnen Kanäle sehr unterschiedliche Werte annehmen können. Da die Werte des VARI durch die fehlende Normierung nicht auf den Wertebereich von -1 bis +1 skaliert sind, schwanken die Werte für eine vitale Vegetation mit den Kameraeinstellungen und können auch negative Werte annehmen. Um nicht signifikante Extremwerte zu vermeiden, wird der VARI auf Werte zwischen -1 und +1 beschränkt. Nichtsdestotrotz sollte für jeden Flug eine eigene Skalierung vorgenommen werden, um die signifikanten Bereiche hervorzuheben.

Der „Excess Green Index“ (ExG) wird sehr häufig verwendet, um Pflanzen von unbedecktem Boden bzw. Stroh zu trennen (Gl. 5).

$$\text{ExG} = 2 \cdot G^* - R^* - B^* \quad \text{Gl. 5}$$

Der Grund dafür ist, dass ExG einen klaren Kontrast zwischen Pflanzen und Boden liefert und nahezu binäre Bilder erzeugt. Um den Index zuverlässiger zu machen und Unterschiede bei der Bildaufnahme bzw. den Beleuchtungs- und Belichtungsverhältnissen zu normieren, wird der Berechnung des Index eine Normierung der einzelnen Kanäle vorgeschaltet, z. B.  $R^* = \frac{R}{R_{Max}}$ .

Auch der „Green Leaf Index“ (GLI), auch als „Visible-Band Difference Vegetation Index“ (VDVI) bezeichnet, kann aus Farbluftbildern berechnet werden (Gl. 6).

$$GLI = \frac{2 \cdot G - R - B}{2 \cdot G + R + B} \tag{Gl. 6}$$

Der GLI, dessen Werte durch die Normalisierung zwischen -1 und +1 schwanken, spiegelt in besonderem Maße den Chlorophyllgehalt wider.

Der VARI, wie die meisten anderen RGB-Indizes auch, hat eine große Schwäche – und zwar Schatten. Bei sonnigem Wetter erzeugen, je nach Sonnenstand, Blätter untereinander und Fahrgassenränder Schatten. Dieser führt bei den gängigen RGB-Indizes zu unbrauchbaren Werten, da sich bei herkömmlichen RGB-Kameras die Verhältnisse zwischen den Rot-, Grün- und Blauanteilen des reflektierten Lichts bei von Pflanzen besonnten und beschatteten Flächen stark unterscheiden. Multispektralkameras mit einem Sonnensensor können die Unterschiede hingegen ausgleichen, sodass z. B. der NDVI in beschatteten Bereichen nahezu der gleiche ist wie bei besonnten Flächen (Abb. 4). Leider sind multispektrale Drohnenkameras teuer.

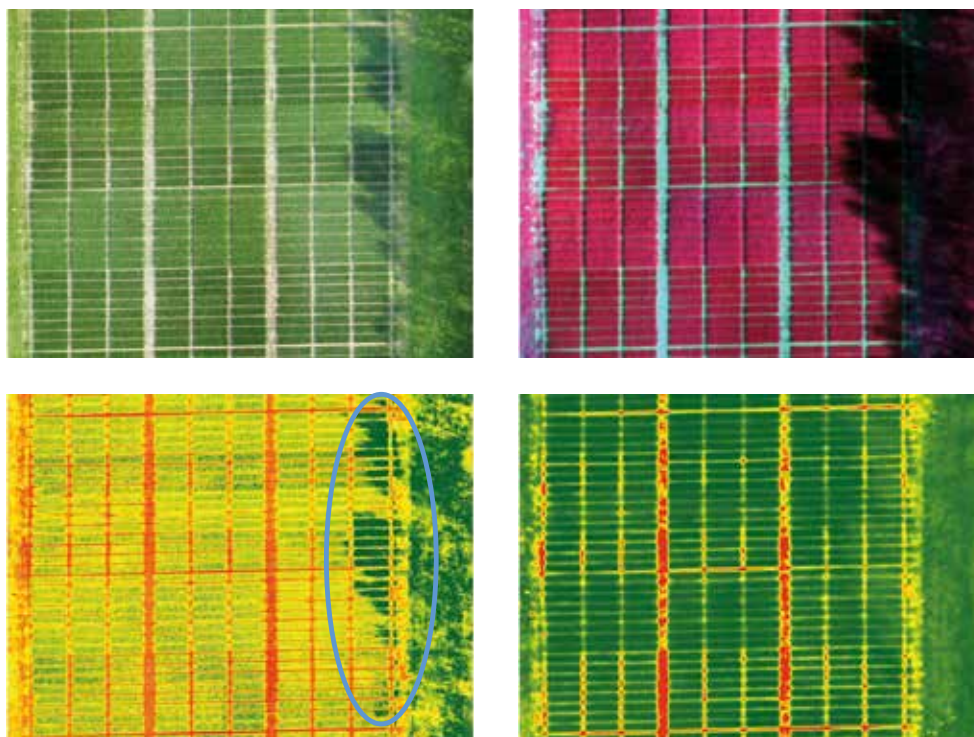


Abb. 4: Auswirkungen von Baumschatten (Ellipse) auf Vegetationsindizes von RGB-Aufnahmen (links oben) vs. Multispektralaufnahmen (rechts oben) am Beispiel des VARI (linke Seite) und des NDVI (rechte Seite) (© G. Grenzdörffer)



Die Schattenproblematik können Besitzer einer Drohne mit einer normalen RGB-Kamera umgehen, indem sie bei möglichst gleichmäßig bedecktem Himmel arbeiten. Dann reduziert sich der Einfluss der Schatten und die abgeleiteten Vegetationsindizes gewinnen an Genauigkeit. Muss bei Sonnenschein geflogen werden, empfiehlt es sich, die Daten vorab deutlich zu vergrößern, z. B. auf eine Rasterweite von  $2 \times 2$  bis  $5 \times 5$  m. So können die negativen Effekte bei der Berechnung von der RGB-Vegetationsindizes verringert werden.

#### 4 Aufnahmezeitpunkte und das richtige Timing

Der Wahl des richtigen Aufnahmezeitpunktes ist zur Beantwortung vieler Fragestellungen von ausschlaggebender Bedeutung. So sind z. B. im Boden befindliche Meliorationsanlagen nur zu ganz bestimmten Zeitpunkten, z. B. im Frühjahr, wenn der offene Boden rasch abtrocknet, aus der Luft sichtbar (Abb. 5).



Abb. 5: Luftbildsichtbare Drainageanlagen, Aufnahme vom 10.03.2019 (© G. Grenzdörffer)

Eine Drohnenaufnahme gibt allerdings immer nur eine Momentaufnahme der Pflanzenentwicklung wieder. Je nach Aufnahmezeitpunkt werden in den Bildern „Zonen“ unterschiedlichen Wachstums bzw. unterschiedlicher Vitalität sichtbar. Diese sind aber nicht unbedingt fest und pflanzenbaulich relevant. Aufnahmen des gleichen Feldes können wenige Tage später schon ganz andere Zonengrenzen aufweisen. Einige Zonen scheinen über die Zeit bzw. Jahre hinweg zu „wandern“ und sich in Form und Größe zu verändern. Das ist allerdings oft ein Trugschluss, da unser Auge versucht, sich an visuellen Grenzen festzuhalten bzw. an „Grenzen“, die durch den Bearbeiter mit einer mehr oder weniger willkürlichen Anzahl von Klassen und Farben erst festgelegt werden. Andere bodenbürtige Zonen hingegen sind über die Zeit stabil und verändern sich parallel zum Rest des Feldes. Um diese Differenzierung zwischen permanenten und temporären Zonen machen zu können, sind multitemporale Daten sehr wichtig.

Die Aufnahme- und Auswerteziträume für die aktuelle Bestandsführung müssen sich an der Maßnahmenabfolge der einzelnen Fruchtarten orientieren. Insgesamt konzentriert sich der Bedarf an aktuellen Bestandsinformationen, z. B. Biomasse oder Stickstoffgehalte, oft auf wenige Monate, wie Abbildung 6 für Winterweizen verdeutlicht.

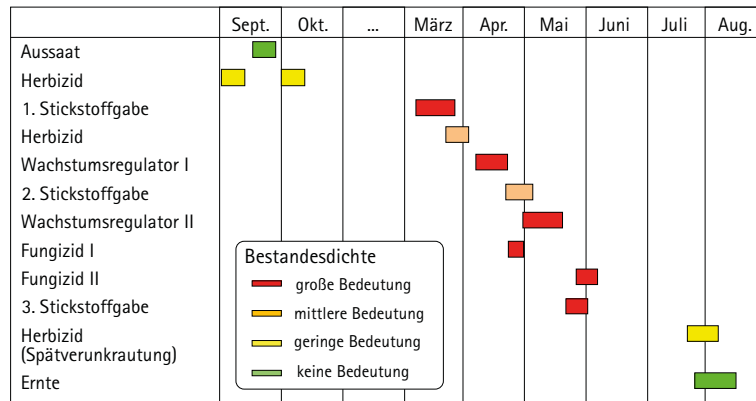


Abb. 6: Bedeutung der Bestandesdichte bzw. Biomasse für teilflächenspezifische Applikationen am Beispiel eines nordostdeutschen Winterweizenbestands (© G. Grenzdörffer)

Vegetationsindizes korrelieren sehr gut mit verschiedenen Pflanzenparametern (u.a. dem Chlorophyllgehalt, dem Stickstoffgehalt, der Biomasse); allerdings nicht zu allen Zeitpunkten bzw. phänologischen Entwicklungsphasen, was im Wesentlichen auf drei Gründe zurückzuführen ist:

- Bei einem Blattflächenindex von weniger als 0,5 ist der Pflanzenbedeckungsgrad noch nicht ausreichend und der Vegetationsindex wird noch stark von der Bodenreflexion beeinflusst. Außerdem können zu diesem Zeitpunkt noch Blattverfärbungen durch die winterliche Witterung das Signal beeinflussen. Schräg blickende traktorbasierte Sensoren hingegen „sehen“ nur das Pflanzensignal und weniger den Boden und können somit früher relevante Informationen ableiten.
- Bei einem Blattflächenindex von 4 und mehr gehen Vegetationsindizes in die Sättigung, was dazu führt, dass die Unterschiede im Aufwuchs nicht mehr durch den Index abgebildet werden können.
- Bei der Blüte (insbesondere bei Raps) versagen die gängigen Vegetationsindizes, da die Blütenblätter nicht grün sind.

Die aus Drohnenbildern abgeleitete Wuchshöhe (Crop Height Model, CHM) hingegen liefert gerade bei dichten Pflanzenbeständen die zuverlässigsten Werte. Bei sehr kleinen Pflanzen reicht die Höhenauflösung allerdings in der Regel kaum aus, um verlässliche Daten zu erzeugen. Da das Längenwachstum mit dem Ende der Blüte im Allgemeinen abgeschlossen ist, kann das CHM Ertragsunterschiede, die sich erst in der generativen Phase bilden und üblicherweise in der Seneszenz spektral sehr deutlich werden, nicht mehr abbilden (Abb. 7).

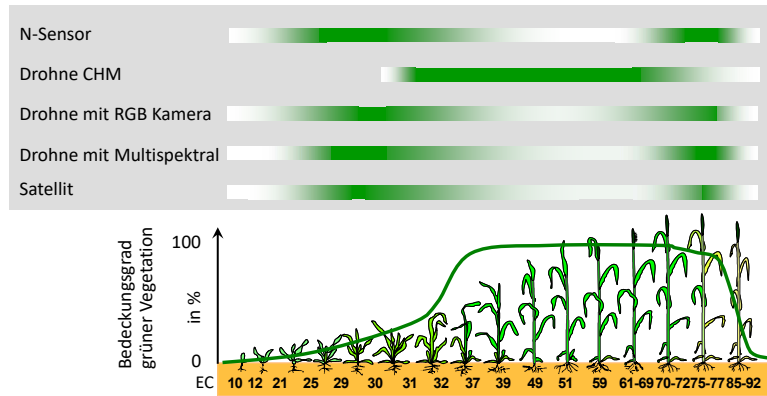


Abb. 7: In grün dargestellte Zeitfenster zur Erfassung der Bestandsheterogenität (Bestandsdichte, Biomasse, Blattflächenindex, Ertrag) von Winterweizen mit verschiedenen Sensoren (© G. Grenzdörffer)

Somit ergeben sich bei der Nutzung von spektralen Sensoren zwei Zeiträume, in denen die Bestandsdichte und alle damit korrelierenden Parameter sehr gut erfasst werden können. Zum einen in der Schossphase (EC 30 bis 39) und zum anderen während der Seneszenz (EC 75 bis 87). Aufnahmen in der Seneszenz korrelieren in der Regel sehr gut mit dem Ertrag.

Da in vielen Teilen Deutschlands das pflanzenverfügbare Wasser den größten ertragslimitierenden Faktor ausmacht, bieten Aufnahmen während längerer Trockenphasen ein zuverlässiges Bild über das Wasserhaltevermögen des Bodens (Abb. 8).



Abb. 8: Trockenschäden in Raps, Ausschnitt einer Drohnenaufnahme vom 05.07.2013 (© G. Grenzdörffer)

Da sich das Wasserhaltevermögen des Bodens über die Zeit kaum ändert, zeigen Aufnahmen mit Trockenstress persistente Zonen unterschiedlicher Wachstumspotenziale sehr gut auf. Die Ausprägung der Zonen schwankt in Abhängigkeit der Jahreswitterung und der angebauten Kultur natürlich von Jahr zu Jahr.

Unterschiede in der Stickstoffversorgung und Mangelerscheinungen, die den Chlorophyllgehalt der Pflanzen beeinflussen, sind auch bei dichterem Pflanzenbestand zu differenzieren.

Je nach Kultur ergeben sich mehrere geeignete Flugtermine für eine Drohne im Laufe einer Vegetationsperiode, die nicht nur auf eine direkte, teilflächenspezifische Maßnahme ausgerichtet sind, sondern auch Bonituren und andere Managemententscheidungen unterstützen (Abb. 9).

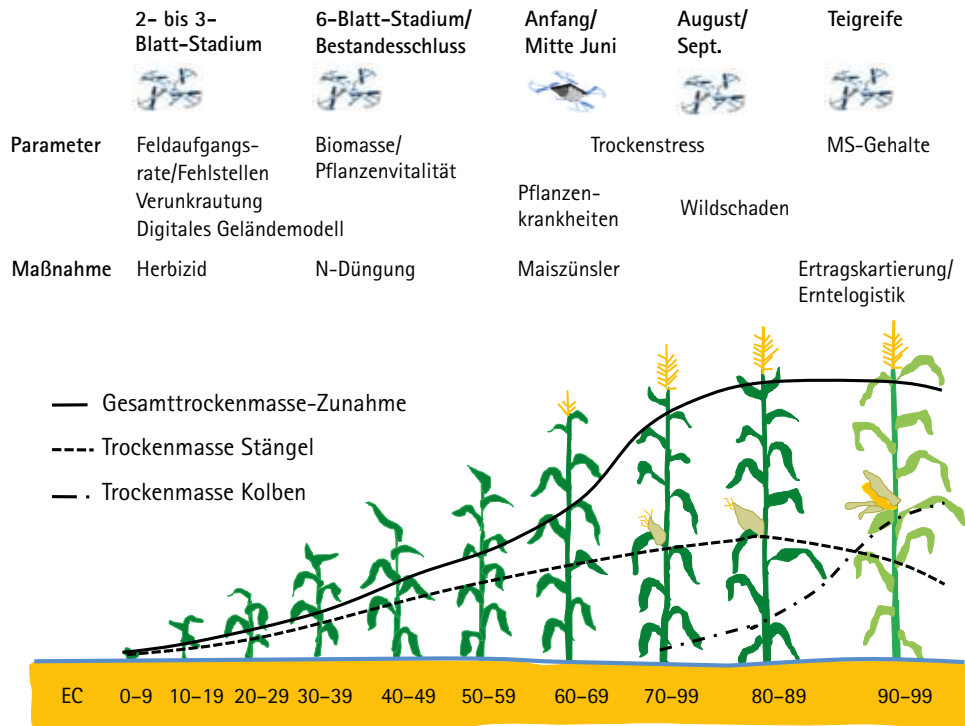


Abb. 9: Optimale Befliegungszeitfenster für Drohnenflüge und die daraus ableitbaren Informationen und teilflächenspezifische Maßnahmen im Mais (© G. Grenzdörffer)

## 5 Auf den Maßstab kommt es an

Die in Drohnenbildern erkennbare Boden- und Bestandsheterogenität verändert sich im Laufe eines Jahres deutlich. Die Analyse der beobachteten Heterogenität ist vom Bildmaßstab bzw. der Bodenauflösung abhängig, da nicht nur die spektrale Reflexion, sondern auch die Textur und andere Merkmale erst eine verlässliche Aussage ermöglichen.

Der Begriff der „Auflösung“ ist in der Fernerkundung ein sehr zentraler, denn er bestimmt, was aus den Drohnenbildern extrahiert werden kann. Dabei unterscheidet man zwischen räumlicher, radiometrischer, spektraler und zeitlicher Auflösung.

Die nahezu beliebige Wahl der räumlichen Auflösung bzw. der Bodenauflösung beim Einsatz von Drohnen vervielfachen die Anwendungsmöglichkeiten, denn die freie Skalierbarkeit ermöglicht sowohl den selektiven Blick auf die einzelne Pflanze mit einer Aufnahme aus nur wenigen Metern Entfernung als auch den großen Überblick des Pflanzenbestands aus größerer Entfernung (Abb. 10 bis 15).



Abb. 10: Aufnahme einer Rapspflanze aus Flughöhe 1 m; Bodenauflösung 0,6 mm je Pixel (© G. Grenzdörffer)

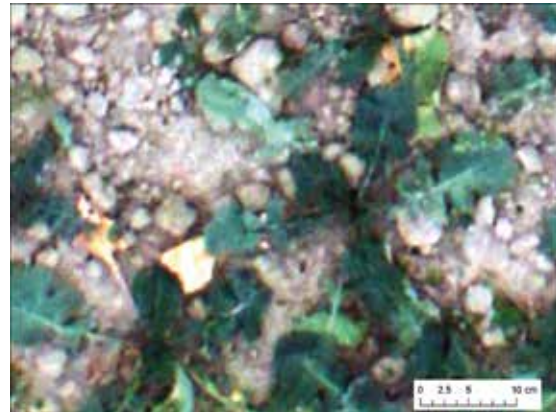


Abb. 11: Aufnahme einer Rapspflanze aus Flughöhe 5 m; Bodenauflösung 1,2 mm je Pixel (© G. Grenzdörffer)

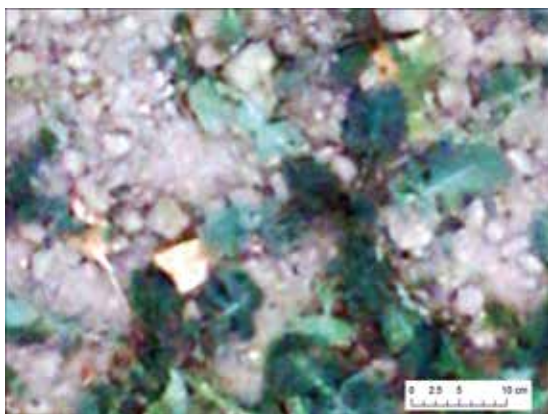


Abb. 12: Aufnahme einer Rapspflanze aus Flughöhe 10 m; Bodenauflösung 2,5 mm je Pixel (© G. Grenzdörffer)

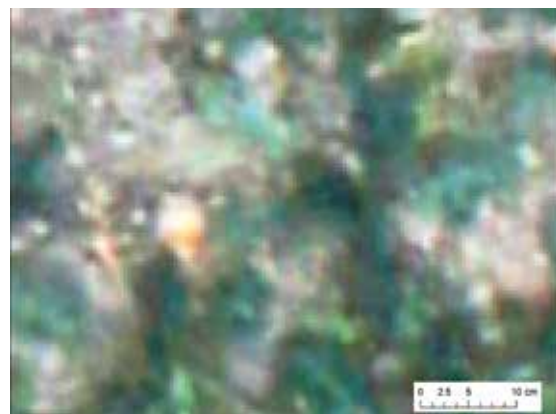


Abb. 13: Aufnahme einer Rapspflanze aus Flughöhe 20 m; Bodenauflösung 5 mm je Pixel (© G. Grenzdörffer)



Abb. 14: Aufnahme einer Rapspflanze aus Flughöhe 40 m; Bodenauflösung 10 mm je Pixel (© G. Grenzdörffer)



Abb. 15: Aufnahme einer Rapspflanze aus Flughöhe 80 m; Bodenauflösung 20 mm je Pixel (© G. Grenzdörffer)

In der Praxis gibt es zwei Möglichkeiten die Bodenauflösung zu variieren: Zum einen über die Flughöhe, da mit steigender Flughöhe die Bodenauflösung geringer wird, und zum anderen über die Brennweite, da bei gleicher Flughöhe mit einer längeren Brennweite (Zoom) eine höhere Bodenauflösung erzielt werden kann.

Mit der Bodenauflösung eng verbunden ist die räumliche Skalen- bzw. Betrachtungsebene, die von der Blattebene über die Einzelpflanzenebene bis zur Parzellen- und Bestandsebene reicht. Die Bodenauflösung ist deshalb in vielerlei Hinsicht von großer Bedeutung und hat auch diverse Konsequenzen zur Folge:

- Die Bodenauflösung bestimmt über die Erkennbarkeit bzw. Trennbarkeit einzelner Objekte und somit auch über die Skalenebene. Bei höchster Bodenauflösung im mm-Bereich können einzelne Blätter bzw. deren Aufbau und Struktur identifiziert werden. Diese hohen Bodenauflösungen werden in der Regel im Labor realisiert. Bei Bodenauflösungen von 0,5 bis 4 cm können, je nach Pflanzenart und Entwicklungsstadium, größere Blätter und einzelne Pflanzen eindeutig separiert werden. Bei Bodenauflösungen von über 4 cm beginnt der Übergang zur Parzellen- bzw. Bestandsebene, d. h. einzelne Pflanzen können nicht mehr separiert werden und der Sensor zeichnet ein Mischsignal auf, das sich aus mehreren Komponenten (Pflanze, Schatten, Boden) zusammensetzt, wie es schon aus der Flugzeug- oder Satellitenfernerkundung bekannt ist.
- Der Befliegungs- und Speicheraufwand steigt exponentiell mit der Bodenauflösung. Eine Halbierung der Bodenauflösung bedeutet gleichzeitig eine Vervierfachung der Datenmenge und der Flugzeit.

Mit den Skalenübergängen sind verschiedene Probleme verbunden. Das betrifft insbesondere die Tatsache, dass sich die spektralen Reflexionseigenschaften stark verändern, je nachdem ob diese an einem einzelnen Blatt(teil) (= Blattebene, Leaf Level) gemessen werden oder einen Mittelwert aus mehreren Komponenten, wie etwa Boden, Pflanze und Schattenanteilen (= Bestandsebene, Canopy Level) darstellen. Da die Sonne als Lichtquelle fungiert, ändern sich die Einstrahlungsbedingungen in Abhängigkeit des Sonnenstands, der Lichtstärke (Wolkenbedeckung, Jahreszeit) und der Pflanzenarchitektur. Darüber hinaus ändern sich die Reflexionseigenschaften auch kontinuierlich während des Pflanzenwachstums und durch Stress. Um es an dieser Stelle abzukürzen: Eine quantitative Ableitung von biophysikalischen Parametern in einer Skala und über Skalengrenzen hinweg ist sehr komplex und Gegenstand vieler Forschungsaktivitäten. Es wird noch einige Zeit dauern, bis ausgereifte und automatisierte Verfahren diese Grenzen überschreiten können.

Handelsübliche Drohnen mit einer 20-Megapixel-Kamera liefern bei einer Flughöhe von 120 m Bilder mit einer Bodenauflösung von wenigen Zentimetern. Das ist für pflanzenbauliche Fragestellungen im Sinne des „Precision Farmings“ eigentlich zu detailliert. Bodenauflösungen von 0,5 bis 5 m sind völlig ausreichend, wenn die Daten für die Erstellung von Applikationskarten genutzt werden sollen. Deshalb kann man für diese Anwendungszwecke in der Datenverarbeitungskette die Auflösung und damit den Zeitaufwand der Datenprozessierung erheblich reduzieren. Wenn es allerdings darum geht, die Drohnen Daten für die Zählung einzelner Pflanzen oder eine Schlagvermessung zu nutzen, ist die hohe Bodenauflösung der Originalbilder notwendig.

## Literatur

- Gitelson, A. A.; Kaufman, Y. J.; Stark, R.; Rundquist, D. (2002): Novel algorithms for remote estimation of vegetation fraction. *Remote Sensing Environment* 80, pp. 76–87
- Xie, Q.; Dash, J.; Huang, W.; Peng, D.; Qin, Q.; Mortimer, H.; Casa, R.; Pignatti, S.; Laneve, G.; Pascucci, S.; Dong, Y.; Ye, H. (2018): Vegetation Indices Combining the Red and Red-Edge Spectral Information for Leaf Area Index Retrieval. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2018.2813281>
- Xue, J.; Su, B. (2017): Significant Remote Sensing Vegetation Indices: A Review of Developments and Applications. <https://doi.org/10.1155/2017/1353691>

## Autor

Dr.-Ing. Görres Grenzdörffer | STZ Geoinformatik, Rostock

**Kuratorium für Technik und Bauwesen  
in der Landwirtschaft e. V. (KTBL)**

Bartningstraße 49 64289 Darmstadt  
Telefon: +49 6151 7001-0  
E-Mail: [ktbl@ktbl.de](mailto:ktbl@ktbl.de) [www.ktbl.de](http://www.ktbl.de)

Eingetragen im Vereinsregister beim Amtsgericht Darmstadt,  
AktENZEICHEN 8 VR 1351

Vereinspräsident: Prof. Dr. Eberhard Hartung  
Geschäftsführer: Dr. Martin Kunisch  
Verantwortlich im Sinne des Presserechts: Dr. Martin Kunisch

Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird im Text das generische Maskulinum verwendet.

© KTBL 2022