

Einsatz von Multi- und Hyperspektralsensoren in der Landwirtschaft

PATRICK O. NOACK¹

Zusammenfassung: Multi- und Hyperspektralsensoren werden in der Landwirtschaft für unterschiedlichste Anwendungen eingesetzt. In Erntemaschinen werden aus den Reflektionen des Ernteguts der Trockenmassegehalt und wertbestimmende Parameter abgeleitet. In Güllefässern kommen sie für die Bestimmung des Nährstoffgehalts zum Einsatz. Bei der mineralischen Düngung werden Multispektralsensoren zur Ableitung des Nährstoffbedarfs von Pflanzen genutzt. Die Messungen von satelliten- oder UAS-getragenen Spektralsensoren dienen der Überwachung der Pflanzenentwicklung, der Bestimmung von Anbaukulturen und des Ertragspotenzials. Im Laborbereich werden sie für die Bestimmung des Futterwerts und wertbestimmender Parameter von pflanzlichen Rohstoffen eingesetzt.

Bei allen Anwendungen spielt die Kalibrierung eine zentrale Rolle. Für jede Zielgröße müssen Beziehungen zwischen den Reflektionen in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen und der Zielgröße abgeleitet werden. Dies erfolgt meist mit Hilfe neuerer mathematischer Methoden wie Künstlichen Neuronalen Netzwerken, Support Vector Machines und Partial Least Squares Regression. Die zentrale Herausforderung ist dabei, dass für eine stabile Kalibrierung eine hohe Anzahl von verlässlichen Referenzwerten erfasst werden muss.

1 Einleitung

Die Reflektion von elektromagnetischer Strahlung steht in Zusammenhang mit den chemischen und physikalischen Eigenschaften der reflektierenden Oberfläche und darunter liegender Schichten. Diese Tatsache machen sich sowohl die Spektroskopie als auch die Augen von Menschen und Tieren zunutze, um Gegenstände zu klassifizieren, also zu bewerten. Dabei wird aus den Reflektionen in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen ein Rückschluss auf die Qualität eines Stoffes oder die Quantität einer seiner Komponenten gezogen.

Das menschliche Auge ist hinsichtlich seiner spektralen Bandbreite auf den Bereich des sichtbaren Lichts (400 nm bis 750 nm) und bezüglich der zeitlichen Auflösung auf eine Abtastfrequenz von 60 Hz beschränkt und hat ein Auflösungsvermögen von etwa 60 Bogensekunden. Dies entspricht bei einer Entfernung von einem Meter eine Pixelgröße von 0,3 mm (SPEKTRUM 2017).

Die Signalverarbeitung ist stark vom physischen und psychischen Zustand, der genetischen Disposition sowie der Sozialisation des Betrachters abhängig („Subjektivität“). Somit ist das menschliche Auge als Sensorsystem vor allem aufgrund der geringen spektralen Bandbreite und der geringen Reproduzierbarkeit der Messergebnisse, aber auch wegen der begrenzten Speicherkapazität des menschlichen Gehirns nur eingeschränkt für die Messwerterfassung geeignet.

Spektralsensoren haben im Gegensatz zum menschlichen Auge den Vorteil, dass Reflektionen reproduzierbar und objektiv erfasst werden können. Sie verfügen zudem meist über eine größere spektrale Bandbreite und erfassen dann im länger welligen Bereich auch die Reflektionen im

¹ Hochschule Weihenstephan-Triesdorf, Agrarsystemtechnik, Markgrafenstr. 16, D-91746 Weidenbach, E-Mail: patrick.noack@hswt.de

nahen Infrarot (NIR, 780 nm bis 1400 nm) oder kurzwelligem Infrarot (SWIR, 1400 nm bis 3000 nm). Die Reflektionen in diesem Spektralbereich stehen in engem Zusammenhang zu landwirtschaftlich relevanten Stoffen wie Wasser, Chlorophyll, Carotinoiden, Fetten und Ölen sowie Lignin (Holz, Stroh) und der organischer Substanz („Humus“).

Aus den oben genannten Gründen ist man in unterschiedlichen Bereichen der Tier- und Pflanzenproduktion dazu übergegangen den Menschen bei der Beurteilung von Böden, Pflanzenbeständen, Futter- und Nahrungsmitteln durch den Einsatz von Spektrosensoren zu unterstützen. Die Ziele sind dabei immer die Produktion von Nahrungsmitteln, Futter und Energie hinsichtlich ihrer einzelbetrieblichen Wirtschaftlichkeit, den Anforderungen der abnehmenden Hand (Lebensmittelbranche), den Wünschen der Verbraucher, der Anforderungen der Gesellschaft und nicht zuletzt der Belastung der Umwelt zu optimieren.

2 Spektrosensoren in der Landwirtschaft

Die in der Landwirtschaft eingesetzten Sensoren unterscheiden sich zum Teil erheblich in Größe, Funktionsweise, räumlicher und zeitlicher Auflösung sowie Bandbreite und Auflösung des gemessenen Spektrums.

2.1 Eigenschaften von Spektrosensoren

Hyperspektrosensoren messen ein kontinuierliches Spektrum über den kompletten Messbereich. Die Auflösung der direkt angrenzenden Banden liegt dabei meist im Bereich von wenigen Nanometern oder darunter. Multispektrosensoren messen einzelne Banden mit stark variierender Bandbreite, die nicht direkt angrenzend sind.

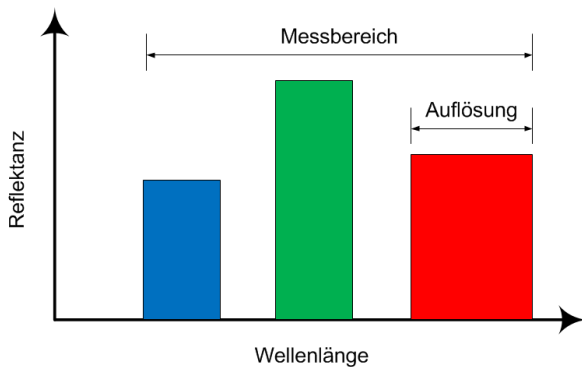


Abb. 1: Multispektrosensor (eigenDarstellung)

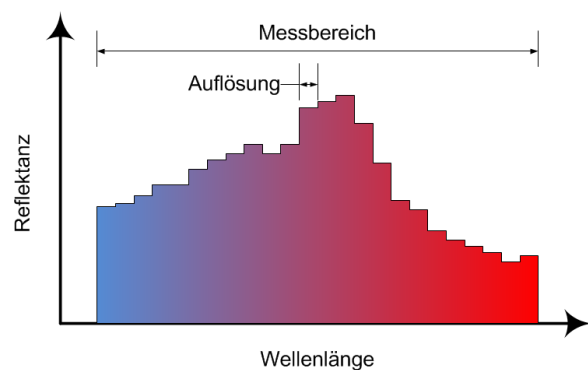


Abb. 2: Hyperspektrosensor (eigenDarstellung)

Spektrosensoren lassen sich zunächst nach der Bildauflösung unterscheiden. Spektrometer sind nicht in der Lage die Rückstrahlung räumlich aufzulösen, fassen also die gesamte Rückstrahlung in einem Messwert zusammen. Die räumliche Abdeckung hängt somit von dem Aufbau der verwendeten Optik ab, die das reflektierte Umgebungslicht bündelt und dem Sensor zuführt.

Bildgebende Verfahren erfassen rasterförmig angeordnete Bereiche, wobei die Bildauflösung erheblich variieren kann (z.B. von 640×480 Pixel bis 6000×4000 Pixel). Bildgebende Spektrosensoren sind bezüglich der Funktionsweise einer Digitalkamera vergleichbar, wobei sie sich bezüglich der erfassten Wellenlängen und der Anzahl der Kanäle unterscheiden. Die räumliche

Auflösung bildgebender Sensoren (in Meter pro Pixel) hängt einerseits von der Bildauflösung und andererseits von der Entfernung zum Untersuchungsobjekt ab. Sensoren an Fahrzeugen oder bodennah eingesetzten Flugobjekten wie UAS liefern auch bei geringer Bildauflösung eine hohe räumliche Auflösung. Satellitenbilddaufnahmen weisen trotz hoher Bildauflösung aufgrund der großen Flughöhe eine geringe räumliche Auflösung im Bereich von 1 bis 60 m auf.

Ein weiteres Unterscheidungskriterium ist, ob das Untersuchungsobjekt aktiv beleuchtet wird (aktive Sensoren) oder die Rückstrahlung des Umgebungslichts gemessen wird (passive Sensoren). Aktive Sensoren sind in der Lage aus der eingestrahnten Energie in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen und der Reflektion direkt die Reflektanz, also das Verhältnis von Rückstrahlung und Einstrahlung, zu berechnen. Passive Sensorsysteme können lediglich die Reflektion bestimmen oder ermitteln die Einstrahlung mit einem zweiten in Richtung der Lichtquelle ausgerichteten Sensor. Ist keine externe Lichtquelle vorhanden (z.B. bei Nacht), ist die Spektralmessung mit passiven Systemen nicht möglich.

Für den Einsatz in der Landwirtschaft sind je nach Anwendung die spektrale Bandbreite und die spektrale Auflösung von Bedeutung. Entscheidende Parameter von Pflanzenbeständen (Chlorophyllgehalt, Biomasse) lassen sich in der Regel mit drei bis fünf Banden (Multispektral) im sichtbaren Bereich (VIS) und nahinfraroten Bereich (NIR) des Lichts bestimmen. Die Qualität der abgeleiteten Größen ist hier jedoch stark von der spektralen Auflösung des Sensorsystems abhängig, die zwischen 1- 2 nm und mehr als 100 nm variieren kann. Bei der Bestimmung von wertbestimmenden Inhaltsstoffen wie Trockenmassegehalt, Rohprotein oder Rohfaser muss zusätzlich das kurzwellige Infrarot (SWIR) erfasst werden.

Für die Qualität der Messungen ist weiterhin entscheidend, welches Trägersystem bei der Messung eingesetzt wird. In der Landwirtschaft kommen Spektrolsensoren handgetragen, an autonomen Kleinfahrzeugen, auf und in landwirtschaftlichen Fahrzeugen wie Traktoren und Erntemaschinen, in landwirtschaftlichen Anbaugeräten (Güllefass) sowie an unbemannten (UAS, Satellit) und bemannten Flugobjekten zum Einsatz.

2.2 Vor- und Nachteile von Sensorsystemen

Die Kosten für Spektrolsensoren unterscheiden sich zum Teil erheblich und steigen in der Regel mit der Bildauflösung und der spektralen Auflösung. Die Vor- und Nachteile für unterschiedliche Einsatzzwecke lassen meist lediglich in Zusammenhang mit der Trägerplattform bewerten.

Für die Bestimmung von wertbestimmenden Eigenschaften verschiedener Stoffe (Erntegut, Gülle) werden in der Regel Spektrometer eingesetzt, die einen Messbereich bis in das kurzwellige Infrarot (SWIR, 1400-3000 nm) erfassen. Diese Sensorsysteme sind trotz der geringen Bildauflösung relativ teuer.

Im Bereich der Pflanzenproduktion kann in der Regel auf einen weiten Messbereich verzichtet werden. Die hier eingesetzten Sensoren messen lediglich die Reflektionen ausgewählter Banden im sichtbaren und nahinfraroten Spektrum und sind somit kostengünstiger. Entscheidend ist hierbei, dass die Pflanzenbestände zum richtigen Zeitpunkt und mit ausreichender spektraler und räumlicher Auflösung erfasst werden.

Fahrzeuggetragene Systeme können nur dann eingesetzt werden, wenn die Befahrbarkeit im Feld gegeben ist. Sie wird – meist im Frühjahr und im Herbst - durch die Bodenfeuchte und die hierdurch bedingte Tragfähigkeit des Bodens begrenzt. Zudem ist der Einsatz dieser Sensorsysteme

nur bis zu einer bestimmten Bestandeshöhe möglich. Diese kann, zum Beispiel beim Anbau von Mais, in späten Vegetationsstadien begrenzend wirken. Der Einsatz von fahrzeuggetragenen Sensoren ist mit erheblichem Aufwand und erheblichen Personal- und Maschinenkosten von ca. 100 EUR/h verbunden. Schließlich erfassen die Sensoren bei der Überfahrt lediglich einen Bereich von wenigen Metern neben dem Fahrzeug, messen also die Reflektionen nicht flächendeckend.

An UAS („Drohnen“) montierte Sensoren erzeugen flächendeckende Aufnahmen von Boden und Pflanzenbeständen. Sie können kurzfristig eingesetzt werden und werden kaum durch Bewölkung beeinträchtigt. Allerdings ist die Flächenleistung vor allem bei Koptersystemen aufgrund der geringen Flughöhe und der begrenzten Kapazität der Akkumulatoren stark eingeschränkt (10 bis 100 ha/Tag). Sowohl UAS- als auch fahrzeuggetragene Systeme können aufgrund der Nähe zum Objekt die Reflektionen mit einer hohen spektralen Auflösung erfassen (1 bis 2 nm) .

Dem hingegen haben Satellitenaufnahmen aufgrund der großen Entfernung meist eine geringere spektrale Auflösung (20 – 200 nm) und sind somit weniger spezifisch mit Eigenschaften der Bestandsoberfläche verknüpft. Ebenso ist die räumliche Auflösung mit meist mehr als 10 m Pixelgröße wesentlich geringer als die von UAS-getragene Sensoren (0,5 bis 5 cm). Eine Satellitenaufnahme deckt in der Regel ein sehr großes Areal von mehreren hundert Quadratkilometern ab. Die Daten sind allerdings nur dann nutzbar, wenn das Untersuchungsgebiet nicht bewölkt ist. Theoretisch ist die zeitliche Auflösung aktueller Satellitenmissionen (z.B. Sentinel 2) für die Überwachung der Entwicklung von Pflanzenbeständen mit einer Aufnahme in drei Tagen ausreichend. In der Praxis stellt die Bewölkung jedoch oft den begrenzenden Faktor für die Nutzbarkeit dar. Die Aufnahmen der Landsat- und der Sentinel-Mission stehen der Öffentlichkeit kostenlos zur Verfügung. Darüber hinaus vertreiben kommerzielle Anbieter Aufnahmen mit höheren räumlichen und unterschiedlichen spektralen Auflösungen.

2.3 Anwendung von Spektrosensoren in der Landwirtschaft

Spektrosensoren werden in der Landwirtschaft für die Messung von Boden-, Dünger- und Pflanzen- und Ernteguteigenschaften eingesetzt.

2.3.1 Boden

Der Einsatz von Spektrometern in Bodensensoren und Sämaschinen ist relativ neu. Die an Scharraggregaten angebrachten Sensoren gleiten dabei durch den Boden und messen Reflektionen im Bereich des sichtbaren und des nahinfraroten Lichts. Das Ziel ist dabei den Gehalt an organischer Substanz („Humus“) zu bestimmen. Der Gehalt an organischer Substanz korreliert eng mit der Fähigkeit des Bodens Wasser und Nährstoffe zu speichern. Die aus den Spektralmessungen abgeleiteten Humusgehalte werden für die Erstellung von Karten oder die Steuerung der Aussaatdichte genutzt. Untersuchungen in Dänemark (KNADEL et al. 2015) haben gezeigt, dass mit dem Veris® MSP System der Gehalt des Bodens an organischer Substanz bestimmt werden kann. Das Produkt SmartFirmer² der amerikanischen Firma Precision Planting funktioniert nach einem vergleichbaren Prinzip und bestimmt zusätzlich die Bodenfeuchte und den Anteil von Ernterückständen im Boden.

² <http://www.precisionplanting.com/products/smartfirmer/>

Tab. 1: Anwendungsbeispiele für Spektrolsensoren in der Landwirtschaft

	Anwendung	stationär/ mobil	Träger	Räumliche Auflösung	Spektrale Auflösung
Boden	Organische Substanz	mobil	Bodensensor	-	Multispektral VIS, NIR
	Organische Substanz, Wasser- gehalt	mobil	Satellit	30 bis 60 m	Multispektral NIR, SWIR
Dünger	N-Konzentration Gülle	mobil	Güllefass	-	Hyperspektral VIS, NIR,SWIR
Pflanzenbestand	Chlorophyllgehalt, N-Bedarf Kulturpflanze	mobil	Traktor	6-8 m neben Fahrspur	Multispektral VIS, NIR
	Biomasse, Ausbringmengen Pflanzenschutz	mobil	Traktor	6-8 m neben Fahrspur	Multispektral VIS, NIR
	Biomasse, Chlorophyllgehalt, Kornfeuchte, Ölgehalt	mobil	UAS	0,5 bis 5 cm	Multi- und Hyperspektral VIS, NIR
	Keimung, Wildschäden, Abreife	mobil	UAS	0,5 bis 5 cm	RGB
	Biomasse, Chlorophyllgehalt	mobil	Kleinflugzeug	5 bis 50 cm	Multispektral VIS, NIR
	Biomasse, Chlorophyllgehalt	mobil	Satellit	5 bis 30 m	Multispektral VIS, NIR, (SWIR)
Futtermittel	Trockenmassebestimmung, Rohprotein Futter	stationär	Labor	-	Hyperspektral VIS, NIR, SWIR
	Inhaltsstoffe Körnerfurchte und Leguminosen (Protein, Öl)	stationär	Labor	-	Hyperspektral VIS, NIR, SWIR
	Trockenmassebestimmung Mais/Grashäcksel	mobil	Feldhäcksler	-	Hyperspektral VIS, NIR,SWIR

Der Gehalt an organischer Substanz kann auch aus Fernerkundungsdaten abgeleitet werden GOMEZ et al. 2008 haben dazu Untersuchungen in Australien angestellt. Aus Satellitenaufnahmen können auch Bodenarten bzw. Bodentypen erkannt und kartiert werden. Hierzu liegen unter anderem Ergebnisse von Vibhute vor (VIBHUTE et al. 2015). Oltra Carrió und Kollegen haben Zusammenhänge zwischen Satellitenaufnahmen und der Bodenfeuchte hergestellt (OLTRA-CARRIÓ et al. 2015).

Alle genannten Parameter wie der Gehalt an organischer Substanz, Bodenarten bzw. Bodentypen und die Bodenfeuchte sind für die Pflanzenproduktion entscheidende Faktoren, die kleinräumig stark variieren können. Durch die Wahl standortangepasster Sorten, die teilflächenspezifische Anpassung von Saattiefe, Düngung und Pflanzenschutz können in Abhängigkeit vom Ausmaß der Variabilität der Eigenschaften Mehrerträge erzielt oder Kosten eingespart werden.

2.3.2 Organische Dünger

Bei der tierischen Erzeugung und der Energieerzeugung aus Biogas fallen erhebliche Mengen organischer Dünger in Form von Jauche, Mist und Gülle an. Diese stellen eine wertvolle Ressource dar, da sie mineralische Dünger zumindest teilweise ersetzen können. Organische Dünger tragen im Gegensatz zu mineralischen Düngern auch zum Aufbau der organischen Substanz von Böden bei. Der Nachteil von organischen Düngern liegt in den stark variablen Nährstoffgehalten. Sie werden bei der Ausbringung aktuell lediglich aufgrund der Untersuchung von Stichproben oder Tabellenangaben berücksichtigt.

Untersuchungen in Italien (CABASSI et al. 2015) haben gezeigt, dass mit NIR-Spektrometern der Trockenmasse-, Kohlenstoff- sowie der Gehalt an organischem Stickstoff und seinem Ammoniakanteil in Kälbergüllen bestimmt werden kann. Die Firma Zunhammer bietet seit mehreren Jahren ein System mit der Bezeichnung VAN-Control³ an, das an Güllefässern montiert fortlaufend den Stickstoffgehalt der Gülle bestimmt und basierend auf den Messwerten die Ausbringmenge regelt. Laut Herstellerangaben kann neben dem Stickstoffgehalt und auch die Konzentration von Kalium und Phosphat mit dem Spektrometer ermittelt werden.

Der Landmaschinenhersteller John Deere nutzt NIR-Spektrometer bereits seit mehreren Jahren um den Trockenmassegehalt des Ernteguts in Feldhäckslern zu bestimmen. Die gleiche Technologie wird nun als Nachrüstlösung für Güllefässer angeboten (JOHN DEERE 2017). Es werden ebenso wie beim VAN-Control System der Trockenmassegehalt sowie die Gehalte an Stickstoff, Kalium und Phosphat ermittelt. Es ist laut Hersteller für Schweinegülle, Rindergülle und Biogasgülle geeignet. Die ausgebrachten Mengen werden auf einem Terminal dargestellt und zum Zwecke der Dokumentation aufgezeichnet.

2.3.3 Düngung und Pflanzenschutz

Fahrzeuggetragene Spektralsensoren werden in der Landwirtschaft oft als N-Sensoren bezeichnet. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Spektralmessungen der Sensoren ursprünglich für die Messung des Stickstoffbedarfs bzw. der Stickstoffaufnahme von Pflanzen entwickelt wurden (REUSCH 1997; SAMBORSKI et al. 2009; ERDLE et al. 2011). Sie werden auf dem Dach der Schlepperkabine oder im Frontanbau montiert und messen dort die Reflektion in ausgewählten Wellenlängenbereichen. Die meisten heute eingesetzten Sensorsysteme erzeugen mit einer Lichtquelle aktiv eine Einstrahlung, so dass sie auch bei Nacht und wechselnden Beleuchtungsbedingungen eingesetzt werden können. Die Reflektionen unterschiedlicher Wellenlängen werden zur Bestimmung der Stickstoffaufnahme zu Indizes verrechnet. Eine Zusammenstellung von in der Landwirtschaft verwendeten Indizes findet sich bei Mulla (MULLA 2013).

Der Stickstoff-Sensor der Firma YARA⁴ nutzt den REIP-Index (*Red Edge Inflection Point*)

$$(1) \quad REIP_{[nm]} = R_{700} + 40 * \frac{\frac{R_{670} + R_{780}}{2} - R_{700}}{R_{740} - R_{700}}$$

Dieser Index korreliert eng mit dem Chlorophyllgehalt der Pflanzen und damit mit der Menge Stickstoff, die die Pflanzen bereits aufgenommen haben. Aus diesem sortenspezifischen Wert

³ <http://www.zunhammer.de/de/produkte/elektronik/van-control>

⁴ <http://www.yara.de/pflanzenernaehrung/tools-und-services/n-sensor/>

lässt sich die Stickstoffmenge ableiten, die die Pflanzen noch aufnehmen müssen, um den erwarteten Ertrag bilden zu können.

Der GreenSeeker Sensor der Firma Trimble⁵ bestimmt den NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*).

$$(2) \quad NDVI_{[nm]} = \frac{R_{NIR} - R_{rot}}{R_{NIR} + R_{rot}}$$

Dieser Index korreliert sowohl mit der Pflanzenmasse als auch mit der Stickstoffaufnahme. Im Gegensatz zum REIP-Index neigt der NDVI dazu bei hohen Chlorophyllgehalten abzusättigen, so dass zwischen Pflanzen mit unterschiedlichen Stickstoffaufnahmen nur noch schlecht unterschieden werden kann. Neben den oben genannten Sensorsystemen wird in der Landwirtschaft ebenfalls der Fritzmeier ISARIA⁶ eingesetzt. Er nutzt die beiden Indizes IBI und IRMI um sowohl die Biomasse als auch die Stickstoffaufnahme zu messen.

Die Besonderheit des ISARIA Systems liegt darin, dass es neben den Spektralmessungen des Sensors auch das Ertragspotential bei der Berechnung der Düngermenge berücksichtigt. Das Ertragspotential wird wiederum von Dienstleistern aus mehrjährigen Satellitenaufnahmen und auf Basis von Wetterdaten und Pflanzenwachstumsmodellen abgeleitet.

Die Firmen John Deere, FarmFacts, Vista, Rauch und Sulky haben mit dem als „Connected Nutrient Management“ bezeichneten Konzept verschiedenste Verfahren der Spektralmessung zusammengeführt (VISTA GEO 2015). Basierend auf mehrjährigen satellitenbasierten Multispektralaufnahmen wird das Ertragspotential von Teilflächen abgeschätzt. Während der organischen Düngung wird der Nährstoffgehalt des Düngers fortlaufend mit Spektralsensoren bestimmt und die Ausbringungsmenge ebenso an den Bedarf angepasst wie bei den nachfolgenden Düngergaben mit mineralischen Stickstoffdüngern.



Abb. 1: ISARIA Stickstoff-Sensor (aus: RECKLEBEN 2014)

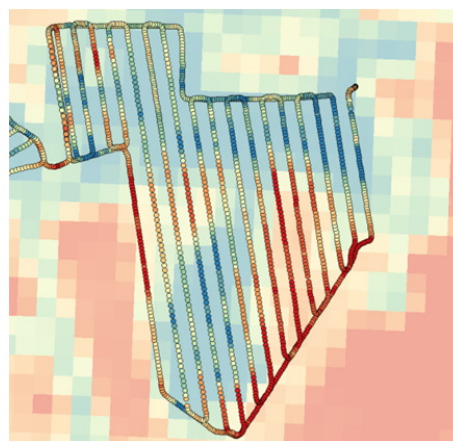


Abb. 2: Messdaten eines Stickstoffsensors (NDVI, Punktdaten) in einem Rapsbestand mit NDVI-Raster aus Landsat 8 Satelliten-aufnahmen (zwei Tage nach Sensorüberfahrt); eigene Darstellung

⁵ <https://agriculture.trimble.com/precision-ag/products/greenseeker/?lang=de>

⁶ <http://fritzmeier-umwelttechnik.com/isaria/>

Grundsätzlich könnten statt der fahrzeuggetragenen Sensoren auch an UAS oder Satelliten montierte Spektriersensoren für die teilflächenspezifische Düngung genutzt werden. Diese Verfahren werden im Gegensatz zu den Online-Sensoren als Offline-Verfahren bezeichnet, da die Daten zunächst erhoben und verarbeitet werden müssen und die Regelung der Stickstoffmenge nicht unmittelbar als Reaktion auf eine Messung erfolgt. Bei den Offline-Verfahren werden in der Regel die gleichen Indizes verwendet wie bei den Online-Verfahren. Der Vorteil der Offline-Verfahren ist, dass die Daten (Landsat-Mission, Sentinel-Mission) kostenlos zur Verfügung stehen und große Gebiete abdecken. Nachteilig wirken sich die geringe zeitliche Verfügbarkeit, der Zeitbedarf für die Verarbeitung und Übertragung von Sollwertkarten auf das Fahrzeug und die teils geringe Auflösung aus. Die auf Basis von Satellitendaten und mit Stickstoff-Sensoren ermittelten Unterschiede im Bestand sind in jedem Fall vergleichbar (s. Abb. 2).

Die Stickstoffdüngung erfolgt über den Verlauf der Vegetation in verschiedenen Gaben. Die Anzahl der Gaben variiert dabei je nach Fruchtart und Bestandesführung zwischen zwei und vier. Die Gesamtmenge orientiert sich dabei am Zielertrag bzw. dem auf einem Feld oder einer Teilfläche zu erwartenden Ertrag. Dieser hängt einerseits von verschiedenen Bodeneigenschaften wie dem Nährstoffgehalt und der Wasserhaltefähigkeit ab, die räumliche Unterschiede aufweisen. Sie bestimmen das (theoretische) Ertragspotential an einem Standort. Die Ertragsersparnis ist das Produkt aus dem Ertragspotential und den jährlich variierenden Wetterbedingungen, also dem Verlauf von Niederschlägen, Temperaturen und anderer Parameter. Für die Bestimmung des Ertragspotentials wird aus den spektralen Informationen von Satellitenaufnahmen mehrerer Jahre die Biomasseentwicklung beurteilt. Diese Informationen können zusätzlich mit Wetterdaten und Pflanzenwachstumsmodellen kombiniert werden. Das Produkt schätzt den Gesamtstickstoffbedarf eines Bestandes teilflächenspezifisch ab und kann entweder direkt für die Ableitung von Sollwertkarten für die standortangepasste Düngung genutzt oder als begrenzende Regelgröße bei der sensorgestützten Düngung eingesetzt werden. Ertragspotentialkarten werden von verschiedenen Firmen als Produkt angeboten (Agrosat⁷, FarmFacts⁸, Geosys⁹, GREENSPIN¹⁰, Kleffmann¹¹, u.a.)

Neben der Ausbringung von Stickstoff können auch andere Betriebsmittel auf Basis von Spektromessungen in ihrer Aufwandmenge variiert werden. So kann die Ausbringung von systemisch wirkenden Fungiziden an die Bestandsentwicklung angepasst werden. Als Maß für die Bestandsentwicklung gilt hierbei meist die Biomasse, die sich aus dem NDVI oder anderen Spektral-Indices ableiten lässt. Die Anpassung der Aufwandmenge stellt einerseits sicher, dass der gesamte Bestand mit einer für die Bekämpfung von Pilzkrankheiten ausreichenden Wirkstoffkonzentration behandelt wird und schränkt andererseits die Ausbringung auf ein ökonomisches Maß ein und spart so Produktionskosten. Untersuchungen dazu wurden unter anderem in Kanada durchgeführt (PICARD et al. 2011).

⁷ <http://www.agrosat.de/>

⁸ <https://www.farmfacts.de/>

⁹ <http://www.geosys.com/>

¹⁰ <https://www.greenspin.de/>

¹¹ www.mydataplant.com

MAHLEIN (2016) betrachtet unterschiedliche Verfahren zur Erkennung von Pflanzenkrankheiten. Neben anderen Verfahren wie der Thermographie und der Chlorophyllfluoreszenzmessung stellen sich dabei auch spektroskopische Verfahren als geeignet heraus. Die Bedingung für den Einsatz von Spektrosensoren bei der Erkennung von Pflanzenkrankheiten ist dabei allerdings eine sehr hohe räumliche Auflösung im Bereich von wenigen Millimetern.

2.3.4 Futtermittel

NIR-Spektrometer werden seit mehr als fünfzehn Jahren in Feldhäckslern für die Bestimmung der Trockenmasse von Gras, Mais und anderen Grünfuttermitteln eingesetzt (KORMANN 2001). Diese Technologie stellt bei fast allen Herstellern von Feldhäckslern den Stand der Technik dar. Ein Spektrometer im Auswurfkrümmer misst fortlaufend die Reflektion des Ernteguts und leitet daraus den Feuchtegehalt ab. Dies dient einerseits der Dokumentation. Andererseits werden die Messwerte genutzt, um die Schnittlänge des Ernteguts der Feuchte anzupassen und die Dosierung von Hilfsmitteln für die Konservierung zu steuern. Zusätzlich können teilweise wertbestimmende Parameter wie der Gehalt des Ernteguts an Rohprotein, Rohfaser und Zucker bestimmt werden (HEINRICH 2005, Herstellerangaben).

Die NIR-Spektroskopie kann auch bei der Getreideernte für die Messung der Feuchte und ausgewählter Qualitätsparameter (Proteingehalt) genutzt werden (RECKLEBEN 2004, REYNS 2002). Diese Technologie hat sich jedoch bisher vornehmlich im Versuchswesen durchgesetzt.

Die NIRS-Technologie wird auch im Laborbereich für die Untersuchung von Futtermitteln und Erntegütern eingesetzt¹². Dort werden Trockenmasse, Rohproteingehalt, Rohfaser- und Rohfettgehalt, Zuckergehalt und andere wertbestimmende Parameter von Gras- und Mais-Silagen mit Hilfe von Spektrometern bestimmt. Auch bei unterschiedlichen Getreidearten wie Weizen, Gerste, Triticale sowie Ölsaaten (Raps, Sonnenblumen, Leinsaat) können mit Hilfe der Spektroskopie Protein-, Öl- und Trockenmassegehalte ermittelt werden.

3 Fazit & Ausblick

Die Spektroskopie wird in der Landwirtschaft in verschiedensten Bereichen für die Bestimmung von physikalischen und chemischen Stoffeigenschaften genutzt.

Sowohl Böden als auch Dünger, Pflanzenbestände und aus Pflanzen gewonnene Produkte können mit Hilfe der Spektroskopie auf ihren Gehalt an wertbestimmenden Inhaltsstoffen oder produktionsrelevanten Parametern (Stickstoff, Pathogene) untersucht werden. Die Methode ist berührungsfrei, zerstörungsfrei und ermöglicht die Ermittlung von Messwerten in Echtzeit und mit hoher zeitlicher Frequenz.

Gleichzeitig steht die Genauigkeit und die Zuverlässigkeit der Ableitung von Stoffeigenschaften aus spektralen Signaturen in engem Zusammenhang mit den für die Ableitung der Zusammenhänge verwendeten Methoden und der Anzahl der für die Modellbildung verwendeten Referenzproben. Nachdem bei der Erstellung von Rechenmodellen, die die Zusammenhänge zwischen den Reflektionen und den Stoffeigenschaften beschreiben, mehrere Spektralkanäle betrachtet

¹² <http://www.vdlufa-nirs.de>

werden, sind einfach zu handhabende mathematische Methoden wie die eindimensionale Regressionsanalyse für die Erstellung von Modellen nicht geeignet. Aus diesem Grund werden für die Modellbildung fortgeschrittene Ansätze wie *partial least squares regression*¹³, künstliche neuronale Netzwerke (artificial neuronal networks, AGATONOVIC-KUSTRIN & BERESFORD 2000) und andere Ansätze (z.B. Support Vector Machine bei DEVOS et al. 2009) für das maschinelle Lernen verfolgt.

Diese neuen Ansätze für die Ableitung von Informationen werden von einigen Wissenschaftlern (MAINZER 2014) kritisiert, da sie das etablierte Vorgehen, das aus einem Prozess- oder Objektverständnis mathematische Beschreibungen ableitet, ersetzt und sich ausschließlich auf die Herstellung eines empirischen Zusammenhangs zwischen Daten und Phänomenen zurückzieht ohne die kausalen Ursachen zu kennen und zu berücksichtigen.

Ungeachtet dessen bieten die genannten Methoden neue Chancen effizient und kostengünstig Stoffeigenschaften zu messen. Dabei gilt, dass insbesondere im landwirtschaftlichen Umfeld die Anzahl der Referenzmessungen einen ausreichend hohen Umfang haben muss und dabei das komplette Spektrum möglicher Variationen abdecken sollte. Sowohl Böden als auch Pflanzen und Pflanzenprodukte weisen aufgrund ihres natürlichen Ursprungs räumlich, zeitlich sowie arten- und sortenbedingt eine große Variabilität auf.

4 Literaturverzeichnis

- AGATONOVIC-KUSTRIN, S. & BERESFORD, R., 2000: Basic concepts of artificial neural network (ANN) modeling and its application in pharmaceutical research. *Journal of Pharmaceutical and Biomedical Analysis*, **22**(5), 717-727.
- CABASSI, G., CAVALLI, D., FUCCELLA, R. & GALLINA, P.M., 2015: Evaluation of four NIR spectrometers in the analysis of cattle slurry. *Biosystems Engineering*, **133**, 1-13, <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2015.02.011>.
- DEVOS, O., RUCKEBUSCH, C, DURAND, A., DUPONCHEL, L. & HUVENNE, J.-P., 2009: Support vector machines (SVM) in near infrared (NIR) spectroscopy: Focus on parameters optimization and model interpretation. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, **96**(1), 27-33.
- ERDLE, K., MISTELE, B. & SCHMIDHALTER, U., 2011: Comparison of active and passive spectral sensors in discriminating biomass parameters and nitrogen status in wheat cultivars. *Field Crops Research*, **124**(1), 74-84, <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.06.007>.
- GOMEZ, C., VISCARRA ROSSEL, R.A. & MCBRATNEY, A.B., 2008: Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. *Geoderma*, **146**(3-4), 403-411, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.06.011>.
- HEINRICH, A., GÜNTHER, A. & BERNHARDT, G., 2005: Bestimmung der Inhaltsstoffe bei der Ernte mit dem Feldhäcksler. *Landtechnik*, **60**(1), 20-21.
- JOHN DEERE, 2017: John Deere Manure Sensing. https://www.deere.com/en_INT/products/equipment/agricultural_management_solutions/precision_farming_solutions/manure_sensing/manure_sensing.page

¹³ <https://cran.r-project.org/web/packages/pls/vignettes/pls-manual.pdf>

- KNADEL, M., THOMSEN, A., SCHELDE, K. & GREVE, M., 2015: Soil organic carbon and particle sizes mapping using vis - NIR, EC and temperature mobile sensor platform. *Computers and Electronics in Agriculture*, **114**, 10.1016/j.compag.2015.03.013.
- KORMANN, G., 2001: Untersuchungen zur Integration kontinuierlich arbeitender Feuchtemesssysteme in ausgewählte Futtererntemaschine. Dissertation, Technische Universität München, Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan, <https://mediatum.ub.tum.de/doc/820167/file.pdf>.
- MAHLEIN, A.-K., 2016: Plant Disease Detection by Imaging Sensors – Parallels and Specific Demands for Precision Agriculture and Plant Phenotyping. *Plant Disease*, **100**(2), 241-251, <https://doi.org/10.1094/PDIS-03-15-0340-FE>.
- MAINZER, K., 2014: Die Berechnung der Welt: Von der Weltformel zu Big Data. C.H.Beck Verlag.
- MULLA, D.J., 2013: Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. *Biosystems Engineering*, **114**(4), 358-371.
- OLTRA-CARRIÓ, R., BAUP, F., FABRE, S., FIEUZAL, R. & BRIOTTET, X., 2015: Improvement of Soil Moisture Retrieval from Hyperspectral VNIR-SWIR Data Using Clay Content Information. *Remote Sens.*, **2015**(7), 3184-3205, doi:10.3390/rs70303184.
- PICARD, R., MARTENS, G., RABE, N., BISHT, V. & DOBSON, C., 2011: Using Aerial Imagery for Site Specific Fungicide Application. <https://doi.org/10.13140/rg.2.2.18921.90727>, https://umanitoba.ca/faculties/afs/agronomists_conf/media/Rejean_Picard_fungicide_app_poster.pdf
- RECKLEBEN, Y., 2004: Innovative Echtzeitsensorik zur Bestimmung und Regelung der Produktqualität von Getreide während des Mähdruschs. Dissertation, VDI-MEG Nr. 424, Kiel.
- RECKLEBEN, Y., 2014: Sensoren für die Stickstoffdüngung – Erfahrungen in 12 Jahren praktischem Einsatz. *Journal für Kulturpflanzen*, **66**(2), 42-47, DOI: 10.5073/JFK.2014.02.02
- REUSCH, S., 1997: Entwicklung eines reflexionsoptischen Sensors zur Erfassung der Stickstoffversorgung landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. Dissertation, VDI-MEG Nr. 303, Kiel.
- REYNS, P., 2002: Continuous measurement of grain and forage quality during harvest. Diss., Katholieke Universiteit Leuven, Faculteit Landbouwkundige en Toegepaste, Biologische Wetenschappen
- SAMBORSKI, S.M., TREMBLAY, N. & FALLON, E., 2009: Strategies to Make Use of Plant Sensors-Based Diagnostic Information for Nitrogen Recommendations. *Agronomy Journal*, **101**(4), 800-816.
- SPEKTRUM, 2017: Lexikon der Neurowissenschaft, Auflösungsvermögen, <http://www.spektrum.de/lexikon/neurowissenschaft/aufloesungsvermoegen/1071>, letzter Zugriff 22.1.2017.
- VIBHUTE, A., KALE, K., DHUMAL, R. & MEHROTRA, S., 2015: Soil type classification and mapping using hyperspectral remote sensing data. *IEEE International Conference on Man and Machine Interfacing (MAMI)*, 1-4, 10.1109/MAMI.2015.7456607.
- VISTA GEO, 2015: Connected Nutrient Management. http://www.vista-geo.de/wp-content/uploads/NutrientManagement_Agritechnica_2015_EN.pdf