

Methodenübersicht zur Fernerkundungsbasierten teilflächenspezifischen Stickstoffapplikation

Im Rahmen des Innovationsprojektes:

Neuartiges Sensorsystem zur teilflächenspezifischen Stickstoffapplikation auf Basis von IoT-Sensornetzwerken und Bildanalysen

Kurzbezeichnung:

Precise Nitrogen

Das Projekt wird im Rahmen der Europäischen Innovationspartnerschaft "Produktivität und Nachhaltigkeit in der Landwirtschaft" (EIP Agri) gefördert.

Inhalt

Abbildungsverzeichnis.....	1
Tabellenverzeichnis.....	1
1. Einleitung	2
2. Proxys	4
3. Messprinzipen	5
3.1 Transmission.....	5
3.2 Reflektanz	5
3.3 Weitere Messprinzipien	6
4. Trägerplattformen und Sensorsysteme.....	6
4.1 Handgeräte	6
4.2 Landfahrzeug basierte Systeme	9
4.3 Drohnensysteme	11
4.4 Satellitensysteme	13
4.5 Überblick über optische Systeme zur Bestimmung des Stickstoffstatus	16
Literaturverzeichnis	18

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verschiedene Sensoren zur Unterstützung der teilflächenspezifischen Stickstoffapplikation.....	3
Abbildung 2: Greenseeker Handheld Crop Sensor. Das Display zeigt den aktuellen NDVI der Pflanzen (Trimble Inc. © 2022).	6
Abbildung 3: SPAD-502 PLUS Blatt-Clip-Sensor zur Abschätzung des Chlorophyllgehaltes (© 2022 Konica Minolta Sensing Europe B.V.)	6
Abbildung 4: Dualex Optical Leafclip Meter zur Bestimmung des Chlorophyllgehaltes in Pflanzen (ITK© 2022).	7
Abbildung 5: Yara N Als Sensor zur Optimierung der Pflanzendüngung (© 2022 Yara)	9
Abbildung 6: Frontmonterer Sensor zur Düngeoptimierung (© 2021 Ag Leader Technology).	9
Abbildung 7: DJI P4 Multispectral mit fest verbauten Sensor (Copyright © 2022 DJI).	12
Abbildung 8: Schaubild zum möglichen Einsatz von Satellitendaten zur teilflächenspezifischen Düngung (©Em7 - stock.adobe.com).	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Auswahl an Hangeräten zur Messung und Abschätzung von Chlorophyll- bzw. Stickstoffgehalten von Pflanzen.....	8
Tabelle 2: Auswahl an vorhandener und zukünftiger Sensortechnik zur landfahrzeugbasierten teilflächenspezifischen Düngeoptimierung.	11
Tabelle 3: Auswahl verschiedener unbemannter Drohnensysteme, welche in der Präzisionslandwirtschaft genutzt werden.	13
Tabelle 4: Auswahl an kommerziellen und frei verfügbaren Satellitendaten für die Präzisionslandwirtschaft.	15
Tabelle 5: Übersicht und Vergleich verfügbarer optischer Systeme zur Stickstoffabschätzung.	16
Tabelle 6: Definition der Bewertungskriterien für Tabelle 5.	17

1. Einleitung

Aufgrund klimatischer Veränderungen, sich ständig ändernder wirtschaftlicher Herausforderungen und einer wachsenden Weltbevölkerung steht die moderne Landwirtschaft zunehmend unter Druck und ist daher gezwungen, möglichst schnell große Mengen landwirtschaftlicher Erzeugnisse zu produzieren. In den letzten Jahrzehnten ist es der globalen Agrarindustrie gelungen, die Produktion von Ackerkulturen zu verdreifachen (Lassaletta et al. 2014a), was jedoch nur durch verbesserte Pflanzensorten, Pestizide und den großflächigen Einsatz von synthetischen Düngemitteln erreicht werden konnte (Lassaletta et al. 2014b). Vor allem Stickstoffdünger spielt eine Schlüsselrolle bei der Förderung des Wachstums bei Pflanzen. (贾南 et al. 2016; Tilman et al. 2002; Sinclair und Rufty 2012). Zu Beginn des letzten Jahrhunderts war der verfügbare Stickstoff für den Pflanzenbau in der Landwirtschaft noch knapp. Erst mit der Entwicklung der Haber-Bosch-Synthese (Modak 2002) und der Verfügbarkeit von Stickstoff in Form von Industriedüngern konnten die bestehenden Grenzen zunächst überwunden werden (Erisman et al. 2008). Im Jahr 2018 wurden rund 190 Mio. Tonnen Düngemittel eingesetzt, davon 58% Stickstoff (World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2020 2020).

Obwohl sich die Düngemitteltechnologie seit Mitte des 19. Jahrhunderts stark verbessert hat (Erisman et al. 2008) und vor allem die wohlhabenderen Industrienationen Vorschriften zur Begrenzung des Düngemiteleinsatzes eingeführt haben, stehen dieses Wissen und diese Technologie in weniger entwickelten Ländern oft nicht zur Verfügung (Richards 1992), so dass entweder zu wenig stickstoffhaltige Düngemittel oder gefährliche Düngemittel eingesetzt werden. Die Industriestaaten haben die mit der Stickstoffdüngung verbundenen Probleme jedoch keineswegs gelöst. Deutschland beispielsweise hat nach einem Urteil des Europäischen Gerichtshofs seine Düngeverordnung verschärft, da 27% der untersuchten Messstellen eine Nitratbelastung von mehr als 50 mg/l aufwiesen (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2020; Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) 2021). Nach der neuen Verordnung sollen die Düngemittel ab Januar 2021 in sog. roten Gebieten um 20 % reduziert werden (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit 2020), um der europäischen Nitratrichtlinie (The council of the european communities 1991) zu entsprechen. Eine Überdüngung kann zu gesundheitlichen, wirtschaftlichen und ökologischen Problemen führen (Berger et al. 2020; Martínez-Dalmau et al. 2021; Byrnes 1990; Ward 2009). Technologisch fortgeschrittene Industrieländer verfügen oft über eine Reihe von Technologien zur Verbesserung der Stickstoffeffizienz im Ackerbau, die jedoch aufgrund hoher Kosten oder anderer Hindernisse nur teilweise angewendet werden (Dobermann et al. 2004), so dass auch hier nicht von einer optimalen Stickstoffeffizienz ausgegangen werden kann. Ein Grund ist oft, dass die Umstellung von traditionellen Methoden auf neuere, effizientere Technologien nicht genügend Anreize bietet.

Da sowohl eine Überdüngung einer Pflanze mit Stickstoff als auch eine Unterdüngung negative Auswirkungen auf die Entwicklung und die endgültige Ernte (Albornoz 2016) und damit auf den Ertrag des Landwirts hat, wird eine standort- und pflanzenspezifische Düngung immer wichtiger und wünschenswert. In der Vergangenheit und in der Gegenwart ist die Überdüngung von Pflanzen in der modernen Landwirtschaft am weitesten verbreitet (Skiba 2014), was zu erhöhtem Pflanzenstress und manchmal zu einer Überproduktion von Blättern führt (Berger et al. 2020; Albornoz 2016). Dies wiederum kann zu einer erhöhten Anfälligkeit der Pflanze für Schädlinge und Krankheiten führen (Powell und Lindquist op. 1997). Außerdem können andere Qualitätskriterien verschiedener Ackerkulturen wie der Zuckergehalt negativ beeinflusst werden (Wang et al. 2008). Die Unterdüngung der Pflanze kann wiederum zu einer geringeren

Chloroplastenzahl und damit zu einer schlechteren Photosyntheseleistung führen (Chlingaryan et al. 2018; Jay et al. 2017; MILFORD et al. 1985). Beide Fälle führen zu einem geringeren Ertrag und sind daher für den Landwirt unerwünscht. Allerdings ist zu beachten, dass neben der Düngung auch zahlreiche andere abiotische Faktoren (z.B. Bodensäure, Feldkapazität, Bodendichte) einen Einfluss auf das Pflanzenwachstum und den Ertrag haben können (Kajla et al. 2015). Neben den finanziellen Verlusten für die Landwirte wirkt sich eine Überdüngung mit Stickstoff auch negativ auf die Umwelt aus. Aufgrund der Überdüngung kann überschüssiger Stickstoff nicht von der Pflanze aufgenommen werden und wird daher durch Auswaschung und Niederschläge aus der Wurzelzone in tiefere Bodenschichten verlagert (Berger et al. 2020; Sebilo et al. 2013; Di und Cameron 2002). In tieferen Bodenhorizonten kann sich der ausgewaschene Stickstoff anreichern. Besonders gefährlich ist die Akkumulation des leicht auswaschbaren Nitrats (NO_3^-), das sich häufig im Grundwasser ansammelt und im menschlichen Körper krebserregend wirken kann (Ward 2009). Weitere Folgen des Stickstoffüberschusses sind die Eutrophierung von Oberflächengewässern und die Beeinträchtigung der biologischen Vielfalt (Martínez-Dalmau et al. 2021; Clark et al. 2017). Insgesamt ist es daher für die landwirtschaftliche Praxis sowohl aus ökonomischer als auch aus ökologischer Sicht unabdingbar, die Stickstoffdüngung zu optimieren und an die abiotischen Faktoren und die jeweiligen Feldfrüchte anzupassen (Scheppers und Mosier 1991). Auf diese Weise können zusätzliche Kosten für Düngemittel, mögliche Ernteverluste durch Überdüngung (EICKHOUT et al. 2006) oder Umweltprobleme minimiert oder sogar vermieden werden.

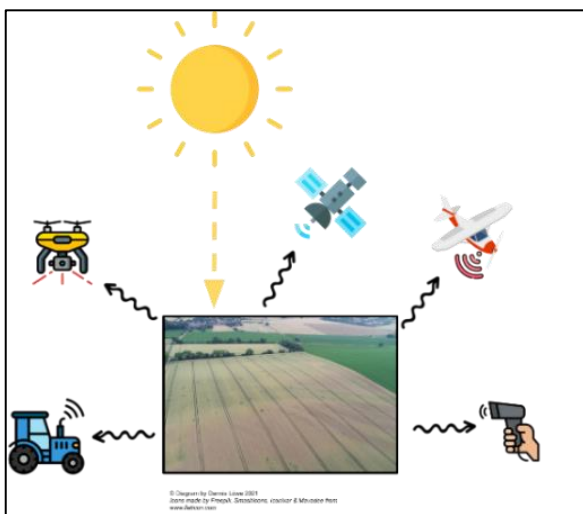


Abbildung 1: Verschiedene Sensoren zur Unterstützung der teilflächenspezifischen Stickstoffapplikation.

Die Präzisionslandwirtschaft (Precision Farming) oder das standortspezifische Pflanzenmanagement (SSMC) zielt darauf ab, dieses Problem mit modernen Technologien zu lösen. Laut der Internationalen Gesellschaft für Präzisionslandwirtschaft (ISPA, (International Society of Precision Agriculture 2022)) wird SSCM definiert als "[...] eine Managementstrategie, die zeitliche, räumliche und individuelle Daten sammelt, verarbeitet und analysiert und sie mit anderen Informationen (z.B. Bodenart) kombiniert, um Managemententscheidungen entsprechend der geschätzten Variabilität für eine verbesserte Ressourcennutzungseffizienz, Produktivität, Qualität, Rentabilität und Nachhaltigkeit der landwirtschaftlichen Produktion zu unterstützen". Diese Definition deckt ein

breites Spektrum an Themen ab, wobei die standortspezifische Düngung ein Kernelement darstellt.

Um die Präzisionslandwirtschaft umzusetzen wurden verschiedene Technologien entwickelt, welche wiederum auf verschiedenen Messprinzipien, basieren. Ziel dieser Übersicht ist es gängige Technologie und Prinzipien vorzustellen und für die Anwendung in der teilflächenspezifischen Stickstoffapplikation zu bewerten.

2. Proxy

Die zerstörungsfreie Erfassung des Stickstoffgehalts ist auch Jahre nach dem Aufkommen der ersten Technologien immer noch ein wichtiges Thema für Wissenschaftler und Anwender (Padilla et al. 2018a; Padilla et al. 2014; Saberioon et al. 2014; Pinheiro und Gusmo dos Anjos 2014). Zur Schätzung des Stickstoffgehalts wird häufig die Beziehung zwischen bestimmten Pflanzenbestandteilen und dem Stickstoffgehalt herangezogen. Die drei wichtigsten Proxys sind Chlorophyll, Flavonoide und Pflanzenproteine wie RuBisCO.

Der am häufigsten verwendete Proxy ist das Blattpigment Chlorophyll (Fu et al. 2021), das visuell an der Grünfärbung des Blattes zu erkennen ist. Chlorophyll ist Teil des Lichtsammelbereichs einer Pflanze und macht etwa 1,7 % des gesamten Stickstoffgehalts der Pflanze aus (Berger et al. 2020). Trotz seines geringen Beitrags zum Gesamtstickstoffgehalt der Pflanze wird das Blattpigment aufgrund seiner guten Korrelation mit dem Stickstoffgehalt der Pflanzen häufig als Proxy verwendet (Ercoli et al. 1993; Evans 1983; Field, C., Mooney, H.A. 1986; Schepers et al. 1996; Bugbee und Monje 1992). Diese positive Korrelation wurde schon früh festgestellt und wird seither häufig verwendet (Evans 1989; Field, C., Mooney, H.A. 1986; Almaliotis et al. 1997). Es gibt sechs chemische Varianten von Chlorophyll, wobei Chlorophyll A und B häufig im Mittelpunkt der Forschung stehen, da diese Moleküle für die Photosynthese verantwortlich sind (Guidi et al. 2017). Zur Durchführung der Photosynthese benötigt eine Pflanze die blauen und roten Komponenten des sichtbaren Lichts (Liu und van Iersel 2021). Dementsprechend liegen die Absorptionsmaxima des Chlorophylls zwischen ~400 und ~700 nm (Gianquinto et al. 2011; Ulissi et al. 2011; Read et al. 2002; Thenkabail et al. 2002). Chlorophyll a absorbiert bei 430 (bzw. 490) nm und 662 nm und Chlorophyll b bei 454 nm und 643 nm (Scheer 1991; Kumar et al. 2001). Andere - für die Stickstoffbestimmung weniger wichtige - Blattpigmente, wie z. B. Carotinoide, absorbieren zwischen 420 und 480 nm (Kumar et al. 2001). Die Reflexion von grünem Licht zwischen ~500 nm und ~600 nm verleiht dem Blatt seine charakteristische Farbe. Da Chlorophyll jedoch eng mit anderen Blattbestandteilen verbunden ist, kann es zu Farbveränderungen kommen. So kann neben einem Stickstoffmangel auch ein Schwefelmangel zu einer verminderten Chlorophyllproduktion und einer sogenannten Chlorose (Ausbleichen) der Blätter führen (Linzon et al. 1979; Snowball und Robson 1991). Auch andere Einflussfaktoren wie Wasserstress oder Pflanzenkrankheiten können zu einer Gelbfärbung der Blätter führen und die Messergebnisse verändern (Snowball und Robson 1991).

Als zweiter Proxy für die Stickstoffschätzung werden Flavonoide verwendet. Flavonoide befinden sich in der Blattepidermis und sind im Allgemeinen polyphenolische Verbindungen auf Kohlenstoffbasis. Sie sind sekundäre Metaboliten, und ihr Gehalt im Pflanzenlaub nimmt zu, wenn das Stickstoffangebot abnimmt (Padilla et al. 2018a; Liu et al. 2010; Bragazza und Freeman 2007; Muñoz-Huerta et al. 2013). Da der Flavonoidgehalt in der Regel invers mit dem Chlorophyllgehalt korreliert, kann dieser als Berechnungsgrundlage verwendet werden (Cartelat et al. 2005). Ein wichtiger Parameter ist dabei die Chlorophyll-Fluoreszenzemission im roten bis fernroten Bereich des Lichtspektrums, die durch Bestrahlung des Chlorophylls mit rotem und ultraviolettem Licht (UV) ausgelöst wird (Buschmann 2007; Krause und Weis 1991). Bei einer erhöhten Anreicherung von Flavonoiden in der Epidermis des Blattes absorbieren diese mehr UV-Strahlung und reduzieren gleichzeitig die Chlorophyllfluoreszenz im fernen roten Bereich (Padilla et al. 2018a). Die Emission der Chlorophyllfluoreszenz im roten Bereich ist dabei jedoch nicht eingeschränkt, so dass aus dem Vergleich von roter und fernroter Fluoreszenz unter UV-Anregung ein Parameter berechnet werden kann (Cartelat et al. 2005; Goulas et al. 2004; Cerovic et al. 2002), der sehr stark mit dem tatsächlichen Flavonoidgehalt korreliert (Tremblay et al. 2012; Cerovic et al. 2012; Ben Ghazlen et al. 2010). Aufgrund der im Gegensatz zur Messung des Chlorophyllgehalts komplizierteren Messtechnik zum Nach-

weis von Flavonoiden hat sich der Proxy bisher nicht durchgesetzt. Erste Studien zeigen jedoch gleichwertige oder bessere Ergebnisse als herkömmlich verwendete Systeme (Cerovic et al. 2012; Zhang et al. 2019).

Ein dritter Proxy ist das Enzym RuBisCO und andere mit Stickstoff assoziierte Pflanzenproteine (Berger et al. 2020b). RuBisCO, dessen Funktion in der CO₂-Fixierung liegt, sticht besonders hervor, da es bis zu 22 % der Stickstoffmasse der Pflanze enthält (Berger et al. 2020) und als das am häufigsten vorkommende Protein der Welt gilt (Ellis 1979). Die Messung und Korrelation von RuBisCO und anderen Proteinen ist im Gegensatz zur Chlorophyllmessung noch in der Erforschung, zumal die optische Messung Wellenlängenbereiche erfordert, die in kommerziellen Produkten noch nicht weit verbreitet sind.

3. Messprinzipien

Zur Abschätzung des Stickstoffgehaltes im Pflanzenbestand wurden verschiedene Messprinzipien entwickelt, welche entweder einen oder mehrere der unter 2. vorgestellten Proxys als Basis für ihre Kalkulation nutzen. Im Folgenden sollen vor allem die zwei in der Landwirtschaft am häufigsten eingesetzten Messprinzipien (Transmission & Reflektanz) ausführlich vorgestellt werden. Weitere aufkommende Messprinzipien und Technologien werden weniger ausführlich diskutiert.

3.1 Transmission

Die Bestimmung biochemischer Parameter und biophysikalischer Eigenschaften von Blatt- und Kronenstrukturen basiert auf den drei Prozessen Absorption, Reflexion und Transmission (Berger et al. 2020). Eine der gebräuchlichsten Methoden zur Schätzung des relativen Chlorophyllgehalts von Kulturpflanzen nutzt die Absorption und Transmissivität von Blättern in Bezug auf mehrere spezifische Strahlungswellenlängen (Padilla et al. 2018a). Dazu gehören insbesondere die rote Strahlung (oft zwischen 650 nm und 660 nm), die vom Chlorophyll absorbiert wird, und die Nahinfrarotstrahlung (NIR, oft zwischen 930 nm und 960 nm), die durch das Chlorophyll durchgelassen wird (Fox und Walthall 2008; Tremblay 2001; Cerovic et al. 2012). Mit zunehmendem Chlorophyllgehalt steigt die Absorption des roten Wellenlängenbereichs, was zu höheren Werten des relativen Chlorophyllgehalts führt (Schepers et al. 1996; Daughtry 2000; Hu et al. 2011). Beispiele für Instrumente, die auf diesen Beziehungen basieren, sind das SPAD-502 (Konica Minolta, Tokio, Japan), der N-Tester (Yara International, Oslo, Norwegen) oder das CCM-100/200 Chlorophyll Concentration Meter (Opti-Sciences Inc., Hudson, USA). Aufgrund der erforderlichen Nähe zum Messobjekt ist die Anwendung dieses Messprinzips auf Handgeräte beschränkt.

3.2 Reflektanz

Bei einer Reflexionsmessung wird häufig die spektrale Eigenschaft genutzt, dass gesunde Pflanzen Licht im photosynthetisch aktiven Bereich (PAR) des elektromagnetischen Spektrums absorbieren und im NIR reflektieren (Galambošová et al. 2014). Der Grund für die Wahl dieser Wellenlängenbereiche für Vegetationsstudien liegt in den sehr unterschiedlichen Absorptionseigenschaften der grünen Vegetation (Homolová et al. 2013; Kokaly et al. 2009). Das Pflanzengewebe reflektiert etwa 90 % des sichtbaren Lichts und etwa 50 % des Lichts im nahen Infrarot, wenn es belichtet wird (Knipling 1970). Da sich die Absorptions- und Reflexionsprozesse mit dem Stickstoffgehalt der Pflanze verändern, kann daraus der Stickstoffstatus abgeleitet werden (SELLERS 1985). Bei schlechter Stickstoffversorgung nimmt die Reflexion von Strahlung im sichtbaren Bereich zu, während gleichzeitig die Reflexion von Licht im nahen Infrarot abnimmt (Schepers et al. 1996; Peñuelas et al. 1994). Darüber hinaus wurde festgestellt, dass der rote Randbereich (RE, 700 ± 40 nm) empfindlich auf den Chlorophyllgehalt in der Blattkrone reagiert (Hatfield et al. 2008; González-Piqueras et al. 2017). Durch die Verwendung mehrerer schmaler Bänder ist es möglich, die stickstoffrelevanten Spektren spezifischer abzubilden und den Stickstoffgehalt entsprechend zu schätzen (Meng und Dennison

2015). Zahlreiche Trägerplattformen wie Satelliten, Drohnen, landwirtschaftliche Fahrzeuge, aber auch Handheld-Geräte nutzen diese Art der Stickstoffschätzung.

3.3 Weitere Messprinzipien

Andere weniger häufig genutzte Messprinzipien umfassen die Fluoreszenz und das LiDAR (light detection and ranging technique). Bei der Fluoreszenzmessung wird die durch die Absorption bestimmter Wellenlängen ausgelöste Energiefreisetzung genutzt um die Chlorophyll- bzw. Stickstoffgehalte der Pflanzen zu bestimmen. Eine intensive Diskussion der Fluoreszenzmessungen findet sich in der Arbeit von Tremblay et al. (2012). Bei der LiDAR-Messung wird mittels eines bzw. mehrere ausgesendeter multispektraler Laserpulse eine Punktwolke generiert, aus welcher dann über die Reflektanz eine Beziehung zum Chlorophyll- bzw. Stickstoffgehalt aufgebaut werden kann. Informationen über experimentelle multispektrale LiDAR-Systeme im Pflanzenbau finden sich in der Studie von Kaasalainen et al. (2007).

4. Trägerplattformen und Sensorsysteme

Zur praktischen Anwendung der beschriebenen Messmethoden sind moderne Sensorsysteme und Trägerplattformen notwendig. Generell kann man zwischen landbasierten und luftbasierten Systemen unterscheiden. Zu den häufigsten luftbasierten Systemen zählen Satelliten und Drohnen. In Ausnahmefällen kommt es auch zur Anwendung von Flugzeugen. Auf dem Boden werden häufig Handgeräte oder auf Landfahrzeugen montierte Systeme verwendet. Meist sind die Sensoren fest mit der Trägerplattform verbaut, in einigen Fällen, ist es aber auch möglich den Sensor unabhängig von der Trägerplattform zu erwerben (z.B. einige Drohnen und Traktorsysteme). Im Folgenden werden die verfügbaren Sensortechniken und Trägerplattformen vorgestellt und ihre Historie, Funktion und Anwendungsmöglichkeiten, sowie die bisherigen wissenschaftlichen Erkenntnisse diskutieren.

4.1 Handgeräte

Handmessgeräte gehörten zu den ersten Messsystemen, die zur Schätzung des Stickstoffstatus von Pflanzen entwickelt wurden. Im Allgemeinen lassen sich die Handgeräte nach ihrer Messmethodik einteilen. Blatt-Clip-Sensoren verwenden das Prinzip der Transmission, während andere Sensoren die Fluoreszenzmessung oder die Reflexion verwenden. Im Allgemeinen wird bei jedem der genannten Systeme der Chlorophyllgehalt für die jeweilige Blattfläche von mehreren mm² geschätzt und berechnet (Bugbee und Monje 1992). Bei den Leaf-Clip-Geräten (z. B. SPAD-502 oder DUALEX) wird das Blatt zwischen Strahlungsquelle und Sensor platziert, um die Durchlässigkeit der elektromagnetischen Strahlung zu messen. Bei anderen Handgeräten (z. B. Greenseeker Handheld Crop Sensor oder RapidScan CS-45) wird der Sensor über dem Blatt oder dem Blätterdach (je nach Messbereich des Geräts) angebracht, um eine Chlorophyllschätzung vorzunehmen. Das Messergebnis wird dann auf dem Display angezeigt und kann exportiert werden. Je nach Sensortyp und Hersteller kann das Ergebnis ein relativer Wert sein, der proportional zum Chlorophyllgehalt der Pflanze ist



Abbildung 2: Greenseeker Handheld Crop Sensor. Das Display zeigt den aktuellen NDVI der Pflanzen (Trimble Inc. © 2022).



Abbildung 3: SPAD-502 PLUS Blatt-Clip-Sensor zur Abschätzung des Chlorophyllgehaltes (© 2022 Konica Minolta Sensing Europe B.V.)

Bei den Leaf-Clip-Geräten (z. B. SPAD-502 oder DUALEX) wird das Blatt zwischen Strahlungsquelle und Sensor platziert, um die Durchlässigkeit der elektromagnetischen Strahlung zu messen. Bei anderen Handgeräten (z. B. Greenseeker Handheld Crop Sensor oder RapidScan CS-45) wird der Sensor über dem Blatt oder dem Blätterdach (je nach Messbereich des Geräts) angebracht, um eine Chlorophyllschätzung vorzunehmen. Das Messergebnis wird dann auf dem Display angezeigt und kann exportiert werden. Je nach Sensortyp und Hersteller kann das Ergebnis ein relativer Wert sein, der proportional zum Chlorophyllgehalt der Pflanze ist

(z.B. SPAD (Peltonen et al. 1995)) oder ein dimensionsloser Wert, der die Stickstoffversorgung

der Pflanze ausdrückt (z.B. Yara N-Tester). Einige Hersteller (z.B. Yara International) bieten auch jährlich aktualisierte Kalibrierungstabellen an, um den Stickstoffgehalt in verschiedenen Kulturen zu schätzen. Um die Heterogenität im Gebiet zu erfassen, ist eine große Anzahl von Messwiederholungen erforderlich.

Mit der Entwicklung des SPAD-Handmessgeräts wurde Ende des 20. Jahrhunderts eines der ersten kommerziell erfolgreichen Stickstoffmessgeräte entwickelt, das seitdem kontinuierlich verbessert wurde. In den folgenden Jahren wurden zahlreiche konkurrierende Produkte für wissenschaftliche und angewandte Zwecke entwickelt. Das Chlorophyllmessgerät SPAD-502 ist eines der am häufigsten verwendeten Handmessgeräte in der Wissenschaft. Dies ist vor allem auf die gute Korrelation seines gemessenen Chlorophyllgehalts ($R^2 > 0,7$, (Antille et al.)) mit der Stickstoffkonzentration in Mais und Weizen zurückzuführen (Chen 2015). Andere Studien (Prost und Jeuffroy 2007; Debaeke et al. 2006) verglichen SPAD-502-Messwerte mit dem Stickstoffnährstoffindex (NNI) in Weizen und stellten eine gute Korrelation fest ($R^2 > 0,89$). Der NNI wird häufig zur Bestimmung des Stickstoffstatus von Pflanzen während der Vegetationsperiode verwendet. Der Index wird durch das Verhältnis zwischen dem aktuellen prozentualen Stickstoffgehalt und dem für ein optimales Wachstum erforderlichen N beschrieben (Berger et al. 2020; Lemaire et al. 2008). Ein $NNI > 1$ steht für einen Stickstoffüberschuss, ein $NNI < 1$ für einen Mangel. Trotz der guten Ergebnisse des SPAD-502 wurde festgestellt,

dass das Gerät bei hohen Chlorophyllwerten aufgrund von Sättigung keine genauen Ergebnisse liefert (Imanishi et al. 2010; Antille et al.). Ein weiterer Nachteil aller transmissionsbasierten Geräte ist die kleine Messfläche und die kleinräumige Anwendbarkeit, da stets ein Kontakt zum Messobjekt bestehen muss. Neben dem SPAD-502 wurden in einer Studie von Dong et al. (2019) (Dong et al. 2019) das CCM-200-CCI und das Dualex-4-Chl (Force-A Orsay, Frankreich) auf ihre Fähigkeit zur Bestimmung des Chlorophyllgehaltes getestet. Bei der Messung von Raps, Mais, Sojabohnen und Sommerweizen konnte festgestellt werden, dass der DU-ALEX-Sensor im Durchschnitt die beste Korrelation ($R^2 = 0,74$, $RSME = 6,25$) mit den Laborergebnissen zeigte. Die beiden anderen Messgeräte zeigten jeweils bessere Ergebnisse für bestimmte Kulturarten (SPAD-502 (Mais): $R^2 = 0,9$, $RSME = 3,68$; CCM-200-CCI (Sojabohnen): $R^2 = 0,84$, $RSME = 3,44$) und hatten eine Tendenz zu erhöhten Fehlern, wenn das Blattchlorophyll hohe Werte erreichte (Dong et al. 2019).

In der angewandten Landwirtschaft werden Blatt-Clip-Sensoren von bekannten Herstellern wie Yara und CropScan häufig zur Überwachung des Stickstoffstatus einzelner Pflanzen eingesetzt. Diese Geräte sind aufgrund ihrer niedrigen Anschaffungskosten und schnellen Ergebnisse sehr beliebt. Einige Sensoren sind jedoch nur auf bestimmte Pflanzenarten kalibriert, so dass der Anwendungsbereich begrenzt ist. Handgehaltene Systeme, die auf Reflexionsmessungen basieren, werden seltener verwendet.



Abbildung 4: Dualex Optical Leafclip Meter zur Bestimmung des Chlorophyllgehaltes in Pflanzen (ITK© 2022).

Tabelle 1: Auswahl an Hangeräten zur Messung und Abschätzung von Chlorophyll- bzw. Stickstoffgehalten von Pflanzen.

Gerät	Hersteller	Messprinzip	Für die kommerzielle Anwendung	Referenz
SPAD-502 plus	Konica Minolta (Tokyo, JPN)	Transmittance	+	(Padilla et al. 2018a; Brunetto et al. 2012)
N-Tester	Yara International (Oslo, NOR)	Transmittance	+	(Padilla et al. 2018a)
atLEAF+	FT Green LLC (Wilmington, DE, USA)	Transmittance	+	(Padilla et al. 2018a; Novichonok et al. 2016)
clorofiLOG	FALKER (Porto Alegre, BR)	Transmittance	+	(Schlichting et al. 2015)
CL-01	Hansatech Instruments Ltd (King's Lynn, UK)	Transmittance	+	(Cassol et al. 2008)
CCM-100/200	Opti-Sciences Inc. (Hudson, NH, USA)	Transmittance	+	(Cerovic et al. 2012)
MC-100	Apogee Instruments Inc. (Logan, UT, USA)	Transmittance	+	(Padilla et al. 2018b)
MULTIPLEX	Force-A (Orsay, FRA)	Fluorescence	-	(Zhang et al. 2012)
DUALEX	Force-A (Orsay, FRA)	Transmittance Fluorescence	-	(Cerovic et al. 2012)
ASD Fieldspec Handheld 2	Malvern Instruments (Malvern, GB)	Reflectance	-	(Pascucci et al. 2020)
HandySpec FieldVIS/NIR	Tec5 (Oberrusel, GER)	Reflectance	-	(Schaumberger et al. 2015)
Trimble Greenseeker Handheld	Trimble Inc. (Sunnyvale, CA, USA)	Reflectance	-	(Del Corso et al.)
Plant-O-Meter	BioSense Institute / ANTARES project	Reflectance	+	(Kitić et al. 2019)
RapidSCAN CS-45	Holland Scientific (Lincoln, NE, USA)	Reflectance	+	(Aranguren et al. 2020)
MSR5 / 87 / 16R ¹	CropScan Inc. (Rochester, MN, USA)	Reflectance	-	(Padilla et al. 2018a)
Spectral Reflectance Sensor ¹	METER Group, Inc. (Pullman, WA, USA)	Reflectance	-	(Padilla et al. 2018a)
Headwall Nano-Hyperspec ¹	Headwall Photonics Inc. (Bolton, MA, USA)	Reflectance	-	(Pascucci et al. 2021)
Fieldscout CM 1000 Chlorophyll Fieldscout CM 1000 NDVI	Spectrum Technologies (Aurora, IL, USA)	Reflectance	-	(Afonso et al. 2017)

4.2 Landfahrzeug basierte Systeme

Den Landwirten steht heute eine breite Palette von fahrzeugmontierten Stickstoffsensoren zur Verfügung. Bereits Ende der 1990er Jahre wurden die ersten Geräte entwickelt, die seither kontinuierlich verbessert wurden. Söderström et al. (2004) berichtete bereits in seiner Studie in Schweden, dass ein großer Teil der befragten Landwirte durch den Einsatz der Technologie eine Ertragssteigerung (ca. 2,4%) erfuhr. Gleichzeitig stellte die Studie jedoch fest, dass eine Investition in einen solchen N-Sensor erst ab einer Fläche von 250 Hektar wirtschaftlich sinnvoll ist. Reckleben (2014) (Reckleben 2014) hingegen empfiehlt den Einsatz der Technologien für Flächen zwischen 300 und 400 Hektar und betont, dass mit der gleichen Düngermenge höhere Proteingehalte erreicht werden können, der Einfluss der Regionalität aber oft unterschätzt wird.



Abbildung 6: Frontmonterter Sensor zur Düngeroptimierung (© 2021 Ag Leader Technology).



Abbildung 5: Yara N Als Sensor zur Optimierung der Pflanzendüngung (© 2022 Yara)

Während die vorgestellten Messprinzipien für die Handgeräte je nach Gerätesystem variieren, hat sich für die Stickstoffabschätzung am Fahrzeug die multispektrale Reflexionsmessung durchgesetzt. Je nach System können die Sensoren entweder an der Sitzkammer (z.B. Yara-N Sensor) oder vor dem Traktor (z.B. Crop Circle ACS) montiert werden und berechnen aus den Messdaten eine Düngempfehlung für den Landwirt. Da diese Systeme, ebenso wie viele Handmessgeräte, über eine eigene Lichtquelle verfügen, sind sie weniger abhängig von Sonnenlicht und Wetter als beispielsweise Drohnen, Flugzeuge oder satellitengestützte Systeme. Im Gegensatz zu vielen Handsensoren wird jedoch ein Wert für die Baumkrone und nicht für das einzelne Blatt ermittelt. Daher sind die Reflexionsergebnisse stark mit der Pflanzenbiomasse und der Blattfläche korreliert. Auch die Ausrichtung des Sensors kann die Messergebnisse beeinflussen (Shaver et al. 2017). Obwohl die Anwendbarkeit eine relative Unabhängigkeit von den Lichtverhältnissen zeigt, können andere Umgebungsbedingungen (z. B. Regen und Bodenbeschaffenheit) bei den Messungen mit den genannten Systemen dennoch ein wesentlicher Störfaktor sein. So kann es beispielsweise sein, dass die Befahrbarkeit des Feldes durch Regenereignisse eingeschränkt ist. Insgesamt ist auch die räumliche Abdeckung bei fahrzeugbasierten Technologien geringer als bei UAV- oder satellitengestützten Systemen. Dennoch lassen sich mit den genannten Systemen immer noch deutlich größere Flächen erfassen als mit den punktuellen Messungen von Handgeräten.

Beim Vergleich zweier Sensoren (Yara-N und Greenseeker) stellten Tremblay et al. (2009) (Tremblay et al. 2009) fest, dass insbesondere der Yara-N-Sensor im frühen Wachstum empfindlicher war. Beim Vergleich von Mais und Weizen wurde festgestellt, dass der Greenseeker bei Weizen variabler reagierte als der Yara-Sensor. Bei Mais zeigten beide Sensoren ähnliche Ergebnisse. Insgesamt reagieren Kronendachsensoren, die auf Bodenfahrzeugen montiert sind, oft sehr gut auf Parameter wie Blattneigung, Pflanzenabstand und Wachstumsstadium (Tremblay et al. 2009). Weitere Auswertungen anderer wissenschaftlicher Projekte zeigen ähnliche Ergebnisse: Amaral et al. (2015) (Amaral et al. 2015) beobachteten an Zuckerrohr,

dass die genannten Parameter einen großen Einfluss auf alle dort untersuchten Sensoren (Crop Circle ACS-210, Crop Circle ACS-430 und Greenseeker) haben. Im Versuch konnte nur eine sehr geringe Korrelation mit der unabhängigen Messung mit einem Chlorophyllmessgerät festgestellt werden (Amaral et al. 2015). Cao et al. (2013) (Cao et al. 2013) bestätigten diese bisherigen Ergebnisse und zeigten, dass bei Reis die Bestimmung des Stickstoffgehaltes mittels Crop-Circle ACS-470 nur geringe Korrelationen aufweist (R^2 maximal 0,33). Shaver et al. (2011) (Shaver et al. 2011) konnten beim Vergleich zweier Canopy-Sensoren (GreenSeeker Modell 505 und ACS-210 Plant Canopy Reflectance Sensor) eine Korrelation zwischen NDVI und ausgebrachtem Stickstoffdünger ($R^2 = 0,89$) feststellen und die Stickstoffvariabilität in Mais unter Bewässerungsbedingungen in Colorado gut abbilden. Insgesamt lässt sich feststellen, dass die fahrzeuggesteuerten Kronendachsensoren bei der quantitativen Bestimmung des Stickstoffgehaltes geringe Korrelationen aufweisen, jedoch gute Ergebnisse bei der Abschätzung von Stickstoffstress und NNI liefern ($R^2 = 0,76$ bei Reis) (Cao et al. 2013).

In der Landwirtschaft haben sich in den letzten Jahren zunehmend bodengebundene Systeme etabliert. Die Hersteller werben mit einer erhöhten Stickstoffeffizienz bei der teilflächenspezifischen Düngung (z.B. (Yara United Kingdom 2017)). Die Anschaffungskosten der Systeme liegen je nach Ausstattung oft zwischen 10.000 und 50.000 €. Zusätzlich zu den Systemen werden häufig cloudbasierte Anwendungen für die weitere Planung und Bewirtschaftung der Felder angeboten. Die Daten anderer Feldsensoren desselben Herstellers können in der Regel genutzt werden, um die Genauigkeit des Managementsystems zu erhöhen.

Tabelle 2: Auswahl an vorhandener und zukünftiger Sensortechnik zur landfahrzeugbasierten teilflächenspezifischen Düngeoptimierung.

Gerät	Hersteller	Messprinzip	Quellen
OptRx Crop Sensor	Ag Leader Technology (Ames, IA, USA)	Reflektanz	(Sivarajan et al. 2020; Robin Gebbers 2014)
Topcon CropSpec Crop Canopy-Sensor	Topcon Positioning Systems, Inc. (Livermore, CA, USA)	Reflektanz	(Robin Gebbers 2014; Reckleben 2014)
Claas Fritzsche Isaria Crop Sensor	CLAAS Vertriebsgesellschaft mbH (Harsewinkel, DE)	Reflektanz	(Cerovic et al. 2012; Baillie et al.; Reckleben 2014)
Trimble® GreenSeeker® crop sensing system	Opti-Sciences Inc. (Hudson, NH, USA)	Reflektanz	(Amaral et al. 2015; Reckleben 2014)
Crop Circle ACS active crop canopy sensor	Holland Scientific (Lincoln, NE, USA)	Reflektanz	(Cao et al. 2013; Shaver et al. 2011)
Yara N-Sensor ALS 2 / Yara N-Sensor	Yara International (Oslo, NOR)	Reflektanz	(Feiffer et al. 2007; Reckleben 2014)
CropScan 2000H / 3000H	Next Instruments (Candell Park, AUS)	Transmission	(Antille et al.; Long et al. 2005)

Neue Produkte

Gerät	Hersteller	Messprinzip	Quellen
Plant-O-Meter OEM	BioSense Institute / ANTA-RES project	Reflektanz	(Plant-O-Meter 2021)
CropXplorer	CNH Industrial (AgExtend) (London, UK)	Reflektanz	(Agxtend.com CropXplorer 2022)
NIRXact	CNH Industrial (AgExtend) (London, UK)	Reflektanz	(Agxtend.com NIRXact 2022)

4.3 Drohnensysteme

Drohnensysteme für zivile und später agronomische Anwendungen wurden Mitte bis Ende des 21. Jahrhunderts. Nach Angaben von Laliberte (2009) wurden 2004 nur 2 % der registrierten Drohnen für zivile Zwecke genutzt. In den folgenden Jahren ist die Zahl mit der stetigen technologischen Entwicklung weiter gestiegen. Allein im Jahr 2016 wurden in Deutschland rund 400.000 Drohnen verkauft (Vogt 2017). In den USA stiegen die Verkaufszahlen im gleichen Zeitraum um 117 % innerhalb eines Jahres (NPD Group 2017). Mit dem technischen Fortschritt werden Drohnen in den letzten 10 Jahren zunehmend als Trägerplattform für verschiedene multi- und hyperspektrale Kamerasysteme eingesetzt. Insbesondere aufgrund ihrer Flexibilität und der relativ geringen Anschaffungskosten (Laliberte 2009) konnten sich Drohnen auf dem Markt und in der Wissenschaft etablieren. Aufgrund von Problemen wie der geringen Flächenleistung, der teilweise unausgereiften Sensortechnik und den erforderlichen Vorkenntnissen in der Bedienung, den regulatorischen Anforderungen (z.B. UAV-Lizenzen & Flugverbotszonen) und der Datenauswertung ist der Sprung in die angewandte Landwirtschaft nur teilweise gelungen. Dennoch sind Landwirte angesichts sehr heterogener Felder zunehmend an Fernerkundungstechnologien wie Drohnen interessiert, um die Erträge ihrer Felder zu steigern (Cook und Bramley 1998; Robertson et al. 2007).



Abbildung 7: DJI P4 Multispectral mit fest verbauten Sensor (Copyright © 2022 DJI).

Bei der Auswahl von Drohnenplattformen stellt sich jedoch zunächst die Frage, welche Art von Drohne für die gewünschte Anwendung geeignet ist. Grundsätzlich können Drohnen in Drehflügler (She et al. 2014; Kim et al. 2019; Bansod et al. 2017) und Starrflügler (Beard et al. 2005; Everaerts 2008; Bansod et al. 2017) unterteilt werden. Drehflüglerdrohnen lassen sich weiter in Multirotordrohnen und Hubschrauber unterteilen. Während Hubschrauber in der Regel eine große Nutzlast haben und für Kartierungen geeignet sind, hängt die Nutzlast von Multirotordrohnen von der Anzahl der Rotoren

(Kim et al. 2019) und anderen Faktoren ab, wie z. B. der Positionierung des zu transportierenden Gewichts. Im Gegensatz zu Starrflüglern bieten beide Systeme jedoch eine erhöhte Manövrierfähigkeit und, je nach Größe, ein kompakteres Äußeres mit besserer Transportfähigkeit. Im Gegensatz zu Starrflügeldrohnen ist auch die Handhabung einfacher. Starrflüglerdrohnen haben im Gegensatz zu Drehflüglern eine höhere Reichweite und Windstabilität und können Stromausfälle überstehen (Pederi und Cheporniuk 2015 - 2015). Allerdings benötigt ein solches System auch einen Start- und Landeplatz. Darüber hinaus ist eine Starrflüglerdrohne in der Luft schwieriger zu steuern, der Transport ist schwieriger und die Kosten sind höher. Daher werden Drehflüglersysteme auf kleinen Versuchsflächen und Feldern bevorzugt, wo eine erhöhte Mobilität von Vorteil ist, während Starrflüglerdrohnen auf großen Flächen eingesetzt werden können, wo eine große räumliche Abdeckung wichtig ist (Kim et al. 2019). In den letzten Jahren wurden auch Hybriddrohnen entwickelt, die versuchen, die Vorteile beider Plattformen zu kombinieren.

In jedem Fall wird ein Kamera- oder Sensorsystem zur Datenerfassung benötigt. Für professionelle Anwendungen gibt es verschiedene Erfassungssysteme wie RGB-Kameras, multi- und hyperspektrale Sensoren, thermische Systeme und UAV-LiDAR-Sensoren (Yao et al. 2019). Da RGB-Kameras und thermische Systeme im Zusammenhang mit der Stickstoffbestimmung von untergeordneter Bedeutung sind und noch kein hyperspektrales LiDAR-System für den Einsatz auf der UAV entwickelt wurde, werden diese Systeme in den folgenden Abschnitten nicht behandelt. In den letzten Jahren wurden zunehmend leichte Multi- und Hyperspektralkamerasysteme für UAVs entwickelt. Zusätzlich zu den RGB-Bändern decken diese Systeme auch andere Wellenlängen im NIR- und SWIR-Rotlichtbereich (nur hyperspektral) ab (Yao et al. 2019). Generell gibt es weit weniger multi- und hyperspektrale Systeme als RGB-Kameras für den UAV-Einsatz (Tab. 3). Aufgrund der hohen Anschaffungskosten ($\approx 3.000 - 20.000$ €) und Folgekosten für die Verarbeitungssoftware konnten sich die Systeme in der angewandten Landwirtschaft bisher nicht durchsetzen. Dennoch gibt es einige Systeme, die mit höheren Auflösungen als herkömmliche RGB-Kameras aufwarten können (Yao et al. 2019). Eine häufige Verwendung der verarbeiteten Daten ist die Berechnung von Vegetationsindizes (VI). Diese können verwendet werden, um Rückschlüsse auf verschiedene Vegetationsparameter zu ziehen.

Tabelle 3: Auswahl verschiedener unbemannter Drohnensysteme, welche in der Präzisionslandwirtschaft genutzt werden.

UAV	Sensor	Hersteller	Spektrale Auflösung	Referenzen
DJI P4 Multispectral (Quadrocopter)	6x 1/2,9-Zoll-CMOS sensor	DJI (Shenzhen, CN)	RGB, RE, NIR	(Guan et al. 2019)
Quantix Mapper - Multispectral (Fixed Wing)	1/2,3-Zoll-CMOS sensor	AeroVironment Inc. (Semi Valley, CA, USA)	R, G, NIR	(Cummings et al. 2021)
Sensefly eBee SQ (Fixed Wing)	various eBee multispectral sensors	senseFly Inc, (Cheseaux-Losanne, CHE)	sensor dependent	(Zhang et al. 2021)
X	MicaSense Altum	AgEagle Aerial Systems Inc. (Wichita, KA, USA)	RGB, RE, NIR, TIR	(Burns et al. 2022)
	RedEdge-MX	AgEagle Aerial Systems Inc. (Wichita, KA, USA)	RGB, RE, NIR	(Walsh et al. 2018)
	MicaSense DualMX	AgEagle Aerial Systems Inc. (Wichita, KA, USA)	CB ¹ , B, 2x G, 2x R, 3x RE, NIR	(Guan et al. 2019; Zhang et al. 2021)
	Parrot Sequoia	Parrot SA (Paris, FRA)	G, R, RE, NIR	(Guan et al. 2019; Zhang et al. 2021)
	Tetracam MCAW Mini-MCA	Tetracam Inc. (Chatsworth, CA, USA)	6 user selectable narrowband filters	(Lu et al. 2019)

¹coastal blue

4.4 Satellitensysteme

Seit etwa 50 Jahren stehen multispektrale Instrumente an Bord von Satelliten zur Erdbeobachtung zur Verfügung (Khanal et al. 2020). Trotz technischer Beschränkungen in Bezug auf die zeitliche, spektrale und räumliche Auflösung sowie die Rechenkapazität wurde das erste globale landwirtschaftliche Überwachungsprogramm bereits in den späten 1980er Jahren (Caudill, C.E., McArdele, R.C. 1979). Erste groß angelegte Versuche befassten sich hauptsächlich mit der Bestimmung von Erträgen (PINTER et al. 1981) und Kulturarten. Erst Mitte der 90er Jahre wurden die ersten Versuche zur Stickstoffversorgung von Ackerkulturen durchgeführt (Blackmer et al. 1995). Trotz der folgenden technischen Entwicklung im Bereich der frei verfügbaren Satellitentechnik (z.B. Landsat-Programm) dauerte es bis Anfang der 2000er Jahre, bis Satelliten verstärkt im Bereich des Precision Farming zur Stickstoffdiagnostik eingesetzt wurden (Mulla 2013). Die zahlreichen kommerziellen Satellitensysteme (z.B. IKONOS im Jahr 1999 (YANG 2018), Quickbird (Toutin und Cheng 2002) im Jahr 2001 RapidEye im Jahr 2013 (Jung-Rothenhäusler et al. 2008) der 2000er Jahre wurden aufgrund ihrer verbesserten Auflösungen (räumlich, spektral & zeitlich) zunehmend für Anwendungen in der Stickstoffdiagnostik genutzt (Bausch und Khosla 2010; Jia et al. 2012; Magney et al. 2017). Einer der wichtigsten Meilensteine der letzten Jahre war der Start der Sentinel-2-Mission, die seit 2015 kostenlos Satellitendaten mit einer Auflösung von bis zu 10 m und einer zeitlichen Auflösung von 5 Tagen (am Äquator) liefert (Fletcher 2012).



Abbildung 8: Schaubild zum möglichen Einsatz von Satellitendaten zur teilflächenspezifischen Düngung (©Em7 - stock.adobe.com).

Ein Satellit besteht im Wesentlichen aus zwei Komponenten: Der Nutzlast und dem Satellitenbus. Im Falle der Erdbeobachtung und speziell der Stickstoffdiagnostik ist die Nutzlast oft ein multi- oder hyperspektrales Messsystem. Der Satellitenbus hingegen umfasst Systeme wie den Antrieb, die Stromversorgung, die Temperaturregelung, die Positionierung und das Computersystem zur Datenverarbeitung. Entsprechend der Messsensorik messen die meisten Satelliten nach dem Prinzip der Reflexion, obwohl auch andere Messprinzipien (z.B. Fluoreszenz) erprobt wurden. Je nach Satellitenumlaufbahn (sonnensynchrone oder polnahe Umlaufbahn) variieren

die zeitliche und räumliche Auflösung sowie die erfasste Flächenausdehnung (Zhang und Kerle 2008). Für die moderne EO- und Präzisionslandwirtschaft eignen sich vor allem Satelliten mit einer sonnensynchronen oder nahezu polaren Umlaufbahn, da sie aufgrund ihrer geringen Höhe höhere räumliche Auflösungen erzeugen (Zhang und Kerle 2008).

Im Hinblick auf die wissenschaftliche Nutzung von Satellitendaten zur Stickstoffabschätzung von Ackerkulturen ist eine intensive Nutzung der frei verfügbaren Sentinel-2-Daten zu beobachten (Escolà et al. 2017; Segarra et al. 2020; Sharifi 2020). Neben wissenschaftlichen Anwendungen werden Sentinel-2-Daten zunehmend auch von kommerziellen Dienstleistern für ihre On-Farm-Management-Plattformen genutzt (z. B. 365FarmNet von Claas, AgriPort von Agricon oder atfarm von Yara Digital). Neben der Sentinel-2-Konstellation werden auch die Satelliten der Landsat-Serie mit ihren niedrigeren Auflösungen weiterhin für die Stickstoffschätzung genutzt (Croft et al. 2020). Neben freien Satellitendaten wurden auch zahlreiche private Satellitenmissionen gestartet (z. B. Skysat im Jahr 2013 und PlanetScope im Jahr 2016). Über kommerzielle Anbieter kann man deren zum Teil hochauflösende Daten (Auflösung < 10 m) mit häufigen Revisitzeiten (Auflösung < 5 Tage) erwerben. Alle genannten Satellitensysteme nutzen multispektrale Reflexionsmessungen. Für die Stickstoffabfrage müssen die Satellitendaten zunächst transformiert, korreliert und in verschiedene Modelle eingefügt werden. Die Stickstoffabschätzung zur Unterstützung der Düngung wurde ursprünglich mit Hilfe von Spektralindizes durchgeführt (Hansen und Schjoerring 2003). Heutzutage werden fortgeschrittene Stickstoff-Retrieval-Methoden in größerem Umfang angewandt, entwickelt und getestet, zumindest in einem wissenschaftlichen Kontext. Nichtsdestotrotz werden spektrale Indizes oft als Grundlage für weitergehende Stickstoff-Retrieval-Methoden auf der Basis von Satellitendaten verwendet. So nutzt beispielsweise der Anbieter CropSAT frei verfügbare multispektrale Satellitendaten, um Landwirten eine Abschätzung der Stickstoffversorgung ihrer Kulturen zu ermöglichen. Das System verwendet dazu spektrale Indizes. Söderström & Stadig (Mats Söderström et al. 2016) konnten 2016 in einem Test zur Erkennung des Stickstoffstatus in Skandinavien gute Ergebnisse im Vergleich zu bodengestützten Systemen erzielen, weisen aber auf die Notwendigkeit von Kalibrierungsmessungen und das Problem der Bewölkung hin. In ihrer Studie mit Landsat-8-Daten stellten Croft et al. (Croft et al. 2020) fest, dass die Qualität der Schätzung des Chlorophyllgehalts der Baumkronen mit spektralen Vegetationsindizes je nach Index und Zeitpunkt stark variierte, während physikalisch basierte Abrufalgorithmen die besten und stabilsten waren.

Obwohl die kontinuierliche Entwicklung viele Verbesserungen in der Satellitentechnik gebracht hat, gibt es immer noch systemimmanente Probleme, wie z.B. die Abhängigkeit von der Wolkenbedeckung, so dass eine hohe Frequenz von verwertbaren Bildern zwar theoretisch mög-

lich, aber in der Praxis nicht immer anwendbar ist. Um diesen Problemen zu begegnen, gewinnt das Thema Datenfusion immer mehr an Bedeutung. Eines der Hauptziele der Datenfusion kann definiert werden als: "[...] die Integration mehrerer Erfassungen desselben physischen Objekts, um eine neue konsistente Repräsentation aufzubauen, die alle Informationen aus den verschiedenen Modalitäten einschließt (Courty et al. 2016)". In den letzten Jahren wurden beispielsweise bereits erfolgreiche Studien zur Kombination von MODIS-Daten mit z.B. höher aufgelösten Landsat 8- oder RapidEye-Daten durchgeführt (Filgueiras et al. 2020; Yang et al. end_day="05" end_month="07" end_year="2015" start_day="22" start_month="06" start_year="2015"; Tewes et al. 2015), um täglich hochauflösende Daten zu generieren und die Vegetationsdynamik über lange Zeiträume konsistent zu beobachten. Auch im Hinblick auf eine optimale Stickstoffversorgung und Düngung wird der Bedarf an einer kontinuierlichen wolkenfreien, hochauflösenden Satellitendatenzeitreihe immer wichtiger.

Tabelle 4: Auswahl an kommerziellen und frei verfügbaren Satellitendaten für die Präzisionslandwirtschaft.

Bezeichnung	Betreiber	Anzahl der Bänder	Wellenlängenbereich [nm]	Zeitliche Auflösung [Tage]	Räumliche Auflösung [m]	Referenzen
Sentinel-2	European Space Agency (ESA)	13 ¹	440 - 2200	4 – 5 (am Äquator)	10 - 60	(Sharifi 2020)
PlanetScope PS2	Planet Labs, Inc. (San Francisco, CA, USA)	4	445 - 860	1	3.7	(Malchikov et al. 2021; Cai et al. 2019)
Planetcope PS2.SD	Planet Labs, Inc. (San Francisco, CA, USA)	4	464 - 888	1	3.7	(Malchikov et al. 2021; Cai et al. 2019)
Planetscope PSB.SD	Planet Labs, Inc. (San Francisco, CA, USA)	8	431 - 885	1	3.7	(Malchikov et al. 2021)
Skysat	Planet Labs, Inc. (San Francisco, CA, USA)	5	450 - 900	4 - 5	0.6 - 1	(Jain et al. 2016)
SPOT 6/7	Spot Image (Toulouse, FRA)	5	450 - 890	26	1.5 - 6	(Yadegari et al. 2020)
Worldview 2	DigitalGlobe (Westminster, CO, USA)	8	447 - 1043	1.1 – 3.7	0.46 – 1.8	(Huang et al. 2017)
Landsat 7	NASA (Washington, D.C, USA)	8	450 - 12500	16	30 - 60	(Chen und Quan 2012)
Landsat 8 (OLI)	NASA (Washington, D.C, USA)	9	430 – 1380	9	15 - 30	(Agxtend.com CropXplorer 2022; Croft et al. 2020)

In den letzten zehn Jahren wurden mehrere Projekte gestartet und durchgeführt, um neue Sensortechnologien zu testen, z. B. im Bereich der Fluoreszenz- und Reflexionsmessung im

Satellitenbereich. Im Bereich der multispektralen Fernerkundung ermöglichte die Sentinel-2-Konstellation mit ihren frei verfügbaren Daten eine breitere Nutzung von Satellitendaten in der angewandten Landwirtschaft und Wissenschaft (Segarra et al. 2020; Söderström et al. 2017; Sharifi 2020). Um den Nutzen von Hyperspektraldaten in großem Maßstab zu verifizieren, wird eine Reihe neuer Satelliten mit Hyperspektralsensorik entwickelt, die im nächsten Jahrzehnt eingesetzt werden könnten. Der erste von ihnen ist der PRISMA-Satellit, der 2019 von der italienischen Raumfahrtbehörde gestartet wurde und ab 2020 wissenschaftliche Daten liefert. Die Sensortechnologie wurde bereits im Jahr 2009 vorgestellt (Labate et al. 2009). Die Daten von PRISMA sind mit einer räumlichen Auflösung von 30 Metern verfügbar (Loizzo et al. 2019 - 2019). Ein ähnliches Programm verfolgt die deutsche Raumfahrtbehörde mit dem EnMAP-Satelliten, der nach dem Start im Jahr 2022 Hyperspektraldaten für ökologische Forschungszwecke mit der gleichen räumlichen Auflösung liefern wird (Guanter et al. 2015). Ein weiteres Hyperspektralsatellitenprogramm ist CHIME (Copernicus Hyperspectral Imaging Mission), dessen Start für Ende der 2020er Jahre geplant ist und das mit Hilfe fortschrittlicher Messtechnik Informationen im Bereich von 400 bis 2500 nm (30 m räumliche Auflösung) liefern soll (Rast et al. 2021).

4.5 Überblick über optische Systeme zur Bestimmung des Stickstoffstatus

Tabelle 5 vergleicht die in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen genannten optischen Methoden zum Nachweis des Stickstoffstatus anhand von 11 Kriterien. Die Kriterien werden auf einer Skala von "-" bis "++" bewertet (Tab. 6). Die Bewertung der Kriterien erfolgt aus der Sicht eines durchschnittlichen Anwenders. Ein besonderes Kriterium ist dabei das "Technology-Readiness-Levels" (TRL; (Mankins 1995), das versucht, Technologien systematisch nach ihrem Reifegrad zu klassifizieren und zu vergleichen. Insgesamt bietet der TRL eine Einteilung in neun Kategorien von der Erarbeitung von Messprinzipien (TRL 1) bis zur erfolgreichen kommerziellen Anwendung (TRL 9).

Tabelle 5: Übersicht und Vergleich verfügbarer optischer Systeme zur Stickstoffabschätzung.

	Blatt-Clip sensor (Transmission)	Handsensor (Reflektanz)	Fahrzeugmontierter Sensor (Reflektanz)	UAV-basierter Sensor (Reflektanz)	Satelliten-basierter Sensor (Reflektanz)
Reichweite	--	-	-	+	++
Zielbereich	--	-	+	+	++
Zeitliche Auflösung	++	++	++	+	-- / ++ ¹
Spektrale Auflösung	--	-	-	- / + ¹	- / + ¹
Bedienschwierigkeit	++	++	+	-	
Prozessierungsschwierigkeit	++	-	+	--	-
Flexibilität	++	++	++	+	-- / - ¹
Anschaffungskosten	++	+	--	- / + ²	+ / os ⁴
N-Status-Bestimmung	++	+	+	+	+
Wetteranfälligkeit	++	+	+	--	--
TRL ³	9	8 / 9	8 / 9	8 / 9	9

¹Abhängig vom Satelliten und Sensor.

²Abhängig von den Sensorkosten..

³Technology Readiness Level (Mankins 1995). ⁴open source

Tabelle 6: Definition der Bewertungskriterien für Tabelle 5.

Kategorie	Rating	Definition	Category	Rating	Definition
Reichweite	++ + - --	≥ 15 m ≥ 1 m ≈ 1 m ≤ 1 m	Prozessierungsschwierigkeit	++ + - --	Automatisch Teilautomatisiert Benötigt Software und Training Benötigt viel Fachwissen und Software
Zielbereich	++ + - --	Mehrere I km ² Mehrere 100 m ² Mehrere m ² Mehrere cm ²	Flexibilität	++ + - --	Spontan einsetzbar Häufig einsetzbar Selten einsetzbar Nur in spezifischen Situationen einsetzbar
Zeitliche Auflösung	++ + - --	Täglich oder schneller 1 – 3 Tage 7 Tage > 7 Tage	Anschaffungskosten	++ + - --	≤ 5000 ≤ 15000 ≤ 30000 ≤ 1000000
Räumliche Auflösung	++ + - --	≥ 20 Bänder 8 – 20 Bänder 3 – 8 Bänder 2 Bänder	N-Status-Bestimmung ¹	++ + - --	Sehr gute Korrelation Gute Korrelation Mittelmäßige Korrelation Niedrige Korrelation
Bedienschwierigkeit	++ + - --	Ohne Training Einige Tage Training Einige Wochen Training Intensives Training nötig	Susceptibility to environmental influences	++ + - --	Umweltunabhängig Wenige Einschränkungen Häufige Einschränkungen Ständige Einschränkungen

¹Einordnung basiert auf der Korrelation mit dem Pflanzen-N-Gehalt und der Klassifikation von Antille et al., 2018 (Antille et al.)

Literaturverzeichnis

- Afonso, Sandra; Arrobas, Margarida; Ferreira, Isabel Q.; Rodrigues, M. Ângelo (2017): Assessing the potential use of two portable chlorophyll meters in diagnosing the nutritional status of plants. In: *Journal of Plant Nutrition*, S. 1–11. DOI: 10.1080/01904167.2017.1385798.
- Agxtend.com | CropXplorer (2022). Online verfügbar unter <https://agxtend.com/de/produkte/cropxplorer>, zuletzt aktualisiert am 06.02.2022, zuletzt geprüft am 06.02.2022.
- Agxtend.com | NIRXact (2022). Online verfügbar unter <https://agxtend.com/de/produkte/nirxact>, zuletzt aktualisiert am 06.02.2022, zuletzt geprüft am 06.02.2022.
- Albornoz, Francisco (2016): Crop responses to nitrogen overfertilization: A review. In: *Scientia Horticulturae* 205, S. 79–83. DOI: 10.1016/j.scienta.2016.04.026.
- Almaliotis, D.; Therios, I.; Karatassiou, M. (1997): EFFECTS OF NITROGEN FERTILIZATION ON GROWTH, LEAF NUTRIENT CONCENTRATION AND PHOTOSYNTHESIS IN THREE PEACH CULTIVARS. In: *Acta Hortic.* (449), S. 529–534. DOI: 10.17660/ActaHortic.1997.449.73.
- Amaral, Lucas R.; Molin, José P.; Portz, Gustavo; Finazzi, Felipe B.; Cortinove, Lucas (2015): Comparison of crop canopy reflectance sensors used to identify sugarcane biomass and nitrogen status. In: *Precision Agric* 16 (1), S. 15–28. DOI: 10.1007/s11119-014-9377-2.
- Antille, Diogenes L.; Lobsey, Craig R.; McCarthy, Cheryl L.; Thomasson, J. Alex; Baillie, Craig P.: &i>A review of the state of the art in agricultural automation. Part IV: Sensor-based nitrogen management technologies&i>. In: 2018 Detroit, Michigan July 29 - August 1, 2018. 2018 Detroit, Michigan July 29 - August 1, 2018. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Aranguren, Marta; Castellón, Ander; Aizpurua, Ana (2020): Crop Sensor Based Non-destructive Estimation of Nitrogen Nutritional Status, Yield, and Grain Protein Content in Wheat. In: *Agriculture* 10 (5), S. 148. DOI: 10.3390/agriculture10050148.
- Baillie, Craig P.; Thomasson, J. Alex; Lobsey, Craig R.; McCarthy, Cheryl L.; Antille, Diogenes L.: &i>A review of the state of the art in agricultural automation. Part I: Sensing technologies for optimization of machine operation and farm inputs&i>. In: 2018 Detroit, Michigan July 29 - August 1, 2018. 2018 Detroit, Michigan July 29 - August 1, 2018. St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers.
- Bansod, Babankumar; Singh, R.; Thakur, Ritula; Singhal, Gaurav (2017): A comparison between satellite based and drone based remote sensing technology to achieve sustainable development: A review. In: *Journal of Agriculture and Environment for International Development* 111, S. 383–407. DOI: 10.12895/jaeid.20172.690.
- Bausch, W. C.; Khosla, R. (2010): QuickBird satellite versus ground-based multi-spectral data for estimating nitrogen status of irrigated maize. In: *Precision Agric* 11 (3), S. 274–290. DOI: 10.1007/s11119-009-9133-1.
- Beard, Randal; Kingston, Derek; Quigley, Morgan; Snyder, Deryl; Christiansen, Reed; Johnson, Walt et al. (2005): Autonomous Vehicle Technologies for Small Fixed-Wing UAVs. In: *Journal of Aerospace Computing, Information, and Communication* 2 (1), S. 92–108. DOI: 10.2514/1.8371.
- Ben Ghazlen, Naïma; Cerovic, Zoran G.; Germain, Claire; Toutain, Sandrine; Latouche, Gwendal (2010): Non-destructive optical monitoring of grape maturation by proximal sensing. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 10 (11), S. 10040–10068. DOI: 10.3390/s101110040.
- Berger, Katja; Verrelst, Jochem; Féret, Jean-Baptiste; Wang, Zhihui; Woche, Matthias; Strathmann, Markus et al. (2020): Crop nitrogen monitoring: Recent progress and principal developments in the context of imaging spectroscopy missions. In: *Remote Sensing of Environment* 242, S. 111758. DOI: 10.1016/j.rse.2020.111758.

- Blackmer, T. M.; Schepers, J. S.; Meyer, G. E. (1995): Remote Sensing to Detect Nitrogen Deficiency in Corn. In: P. C. Robert, R. H. Rust und W. E. Larson (Hg.): Site-Specific Management for Agricultural Systems. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America (ASA, CSSA, and SSSA Books), S. 505–512.
- Bragazza, Luca; Freeman, Chris (2007): High nitrogen availability reduces polyphenol content in Sphagnum peat. In: *The Science of the total environment* 377 (2-3), S. 439–443. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2007.02.016.
- Brunetto, Gustavo; Trentin, Gustavo; Ceretta, Carlos Alberto; Giroto, Eduardo; Lorensini, Felipe; Miotto, Alcione et al. (2012): Use of the SPAD-502 in Estimating Nitrogen Content in Leaves and Grape Yield in Grapevines in Soils with Different Texture. In: *AJPS* 03 (11), S. 1546–1561. DOI: 10.4236/ajps.2012.311187.
- Bugbee, Bruce; Monje, Oscar (1992): The Limits of Crop Productivity. In: *BioScience* 42 (7), S. 494–502. DOI: 10.2307/1311879.
- Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2021): Ackerbaustrategie 2035. Perspektiven für einen produktiven und vielfältigen Pflanzenbau. Hg. v. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Berlin. Online verfügbar unter https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/DE/Broschueren/ackerbaustrategie2035.pdf?__blob=publicationFile&v=7.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (2020): FAQ zur Düngeverordnung. Online verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Binnengewasser/faq_duev_bf.pdf.
- Burns, Brayden W.; Green, V. Steven; Hashem, Ahmed A.; Massey, Joseph H.; Shew, Aaron M.; Adviento-Borbe, M. Arlene A.; Milad, Mohamed (2022): Determining nitrogen deficiencies for maize using various remote sensing indices. In: *Precision Agric.* DOI: 10.1007/s11119-021-09861-4.
- Buschmann, Claus (2007): Variability and application of the chlorophyll fluorescence emission ratio red/far-red of leaves. In: *Photosynthesis research* 92 (2), S. 261–271. DOI: 10.1007/s11120-007-9187-8.
- Byrnes, B. H. (1990): Environmental effects of N fertilizer use ? An overview. In: *Fertilizer Research* 26 (1-3), S. 209–215. DOI: 10.1007/BF01048758.
- Cai, Yaping; Guan, Kaiyu; Nafziger, Emerson; Chowdhary, Girish; Peng, Bin; Jin, Zhenong et al. (2019): Detecting In-Season Crop Nitrogen Stress of Corn for Field Trials Using UAV- and CubeSat-Based Multispectral Sensing. In: *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing* 12 (12), S. 5153–5166. DOI: 10.1109/JSTARS.2019.2953489.
- Cao, Qiang; Miao, Yuxin; Wang, Hongye; Huang, Shanyu; Cheng, Shanshan; Khosla, R.; Jiang, Rongfeng (2013): Non-destructive estimation of rice plant nitrogen status with Crop Circle multispectral active canopy sensor. In: *Field Crops Research* 154, S. 133–144. DOI: 10.1016/j.fcr.2013.08.005.
- Cartelat, A.; Cerovic, Z. G.; Goulas, Y.; Meyer, S.; Lelarge, C.; Prioul, J.-L. et al. (2005): Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.). In: *Field Crops Research* 91 (1), S. 35–49. DOI: 10.1016/j.fcr.2004.05.002.
- Cassol, D.; Silva, F. S. P.; Falqueto, A. R.; Bacarin, M. A. (2008): An evaluation of non-destructive methods to estimate total chlorophyll content. In: *Photosynt.* 46 (4). DOI: 10.1007/s11099-008-0109-6.
- Caudill, C.E., McArdle, R.C. (1979): Research evaluation considerations for AgRISTARS. In: *U.S. Department of Agriculture, Economics, Statistics, and Cooperatives Service* 1979. Online verfügbar unter <https://pubs.usgs.gov/of/2017/1034/ofr20171034.pdf>.
- Cerovic, Z. G.; OUNIS, A.; Cartelat, A.; LATOUCHE, G.; Goulas, Y.; Meyer, S.; Moya, I. (2002): The use of chlorophyll fluorescence excitation spectra for the non-destructive in

- situ assessment of UV-absorbing compounds in leaves. In: *Plant, Cell & Environment* 25 (12), S. 1663–1676. DOI: 10.1046/j.1365-3040.2002.00942.x.
- Cerovic, Zoran G.; Masdoumier, Guillaume; Ghazlen, Naima Ben; Latouche, Gwendal (2012): A new optical leaf-clip meter for simultaneous non-destructive assessment of leaf chlorophyll and epidermal flavonoids. In: *Physiologia plantarum* 146 (3), S. 251–260. DOI: 10.1111/j.1399-3054.2012.01639.x.
- Chen, Jun; Quan, Wenting (2012): Using Landsat/TM Imagery to Estimate Nitrogen and Phosphorus Concentration in Taihu Lake, China. In: *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing* 5 (1), S. 273–280. DOI: 10.1109/JSTARS.2011.2174339.
- Chen, Pengfei (2015): A Comparison of Two Approaches for Estimating the Wheat Nitrogen Nutrition Index Using Remote Sensing. In: *Remote Sensing* 7 (4), S. 4527–4548. DOI: 10.3390/rs70404527.
- Chlingaryan, Anna; Sukkarieh, Salah; Whelan, Brett (2018): Machine learning approaches for crop yield prediction and nitrogen status estimation in precision agriculture: A review. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 151, S. 61–69. DOI: 10.1016/j.compag.2018.05.012.
- Clark, Christopher M.; Bell, Michael D.; Boyd, James W.; Compton, Jana E.; Davidson, Eric A.; Davis, Christine et al. (2017): Nitrogen-induced terrestrial eutrophication: cascading effects and impacts on ecosystem services. In: *Ecosphere* 8 (7). DOI: 10.1002/ecs2.1877.
- Cook, S. E.; Bramley, R. G. V. (1998): Precision agriculture — opportunities, benefits and pitfalls of site-specific crop management in Australia. In: *Aust. J. Exp. Agric.* 38 (7), S. 753. DOI: 10.1071/EA97156.
- Courty, Nicolas; Flamar, Remi; Tuia, Devis; Corpetti, Thomas (2016): Optimal transport for data fusion in remote sensing. In: 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS). IGARSS 2016 - 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Beijing, China, 10.07.2016 - 15.07.2016: IEEE, S. 3571–3574.
- Croft, Holly; Arabian, Joyce; Chen, Jing M.; Shang, Jiali; Liu, Jianguai (2020): Mapping within-field leaf chlorophyll content in agricultural crops for nitrogen management using Landsat-8 imagery. In: *Precision Agric* 21 (4), S. 856–880. DOI: 10.1007/s11119-019-09698-y.
- Cummings, C.; Miao, Y.; Kang, S.; Stueve, K. (2021): 64. Developing a remote sensing and calibration strip-based in-season nitrogen management strategy for corn. In: John V. Stafford (Hg.): Precision agriculture '21. 13th European Conference on Precision Agriculture. Budapest, Hungary, 19-22 July, 2021. The Netherlands: Wageningen Academic Publishers, S. 535–541.
- Daughtry, C. (2000): Estimating Corn Leaf Chlorophyll Concentration from Leaf and Canopy Reflectance. In: *Remote Sensing of Environment* 74 (2), S. 229–239. DOI: 10.1016/S0034-4257(00)00113-9.
- Debaeke, P.; Rouet, P.; Justes, E. (2006): Relationship Between the Normalized SPAD Index and the Nitrogen Nutrition Index: Application to Durum Wheat. In: *Journal of Plant Nutrition* 29 (1), S. 75–92. DOI: 10.1080/01904160500416471.
- Del Corso, M.; Lollato, R. P.; Macnack, N.; Mullock, J.; Raun, B. R.: Evaluation of Trimble Hand Held Crop Sensor and Greenseeker TM Sensors At Different Heights and for Various Crops.
- Di, H. J.; Cameron, K. C. (2002): Nitrate leaching in temperate agroecosystems: sources, factors and mitigating strategies. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 64 (3), S. 237–256. DOI: 10.1023/A:1021471531188.
- Dobermann, Achim; Blackmore, Simon; Cook, Simon; Adamchuk, Viacheslav (2004): Precision farming: Challenges and future directions. In: *Published on CDROM. Web site.*

- Dong, Taifeng; Shang, Jiali; Chen, Jing M.; Liu, Jianguo; Qian, Budong; Ma, Baoluo et al. (2019): Assessment of Portable Chlorophyll Meters for Measuring Crop Leaf Chlorophyll Concentration. In: *Remote Sensing* 11 (22), S. 2706. DOI: 10.3390/rs11222706.
- EICKHOUT, B.; BOUWMAN, A.; VANZEIJTS, H. (2006): The role of nitrogen in world food production and environmental sustainability. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 116 (1-2), S. 4–14. DOI: 10.1016/j.agee.2006.03.009.
- Ellis, R. John (1979): The most abundant protein in the world. In: *Trends in Biochemical Sciences* 4 (11), S. 241–244. DOI: 10.1016/0968-0004(79)90212-3.
- Ercoli, L.; Mariotti, M.; Masoni, A.; Massantini, F. (1993): Relationship between nitrogen and chlorophyll content and spectral properties in maize leaves. In: *European Journal of Agronomy* 2 (2), S. 113–117. DOI: 10.1016/S1161-0301(14)80141-X.
- Erisman, Jan Willem; Sutton, Mark A.; Galloway, James; Klimont, Zbigniew; Winiwarter, Wilfried (2008): How a century of ammonia synthesis changed the world. In: *Nature Geoscience* 1 (10), S. 636–639. DOI: 10.1038/ngeo325.
- Escolà, A.; Badia, N.; Arnó, J.; Martínez-Casasnovas, J. A. (2017): Using Sentinel-2 images to implement Precision Agriculture techniques in large arable fields: First results of a case study. In: *Advances in Animal Biosciences* 8 (2), S. 377–382. DOI: 10.1017/S2040470017000784.
- Evans, J. R. (1983): Nitrogen and Photosynthesis in the Flag Leaf of Wheat (*Triticum aestivum* L.). In: *Plant physiology* 72 (2), S. 297–302. DOI: 10.1104/pp.72.2.297.
- Evans, John R. (1989): Photosynthesis and nitrogen relationships in leaves of C3 plants. In: *Oecologia* 78 (1), S. 9–19. DOI: 10.1007/BF00377192.
- Everaerts, Jurgen (2008): The use of unmanned aerial vehicles (UAVs) for remote sensing and mapping. In: *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37.
- Feiffer, A.; Jasper, Joerg; Leithold, Peer; Feiffer, P. (2007): Effects of N-Sensor based variable rate N fertilization on combine harvest, S. 673–679.
- Field, C., Mooney, H.A. (1986): The Photosynthesis-Nitrogen Relationships in Wild Plants. In: *T. J. Givnish, Ed., On the Economy of Plant Form and Function* 1986.
- Filgueiras, Roberto; Mantovani, Everardo Chartuni; Fernandes-Filho, Elpídio Inácio; Da Cunha, Fernando França; Althoff, Daniel; Dias, Santos Henrique Brant (2020): Fusion of MODIS and Landsat-Like Images for Daily High Spatial Resolution NDVI. In: *Remote Sensing* 12 (8), S. 1297. DOI: 10.3390/rs12081297.
- Fletcher, Karen (Hg.) (2012): ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. European Space Agency. Noordwijk (ESA SP, ESA-SP-1322/2).
- Fox, Richard H.; Walthall, Charles L. (2008): Crop Monitoring Technologies to Assess Nitrogen Status. In: J. S. Schepers und W. R. Raun (Hg.): *Nitrogen in Agricultural Systems*. Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, Soil Science Society of America (Agronomy Monographs), S. 647–674.
- Fu, Yuanyuan; Yang, Guijun; Pu, Ruiliang; Li, Zhenhai; Li, Heli; Xu, Xingang et al. (2021): An overview of crop nitrogen status assessment using hyperspectral remote sensing: Current status and perspectives. In: *European Journal of Agronomy* 124, S. 126241. DOI: 10.1016/j.eja.2021.126241.
- Galambošová, J.; Rataj, V.; Prokeřinová, R.; Prešinská, J. (2014): Determining the management zones with hierarchic and non-hierarchic clustering methods. In: *Res. Agr. Eng.* 60 (Special Issue), S44-S51. DOI: 10.17221/34/2013-RAE.
- Gianquinto, Giorgio; Orsini, Francesco; Sambo, Paolo; D'Urzo, Matilde Paino (2011): The Use of Diagnostic Optical Tools to Assess Nitrogen Status and to Guide Fertilization of Vegetables. In: *hortte* 21 (3), S. 287–292. DOI: 10.21273/HORTTECH.21.3.287.
- González-Piqueras, J.; Lopez-Corcoles, H.; Sánchez, S.; Villodre, J.; Bodas, V.; Campos, I. et al. (2017): Monitoring crop N status by using red edge-based indices. In: *Advances in Animal Biosciences* 8 (2), S. 338–342. DOI: 10.1017/S2040470017000243.

- Goulas, Yves; Cerovic, Zoran G.; Cartelat, Aurélie; Moya, Ismaël (2004): Dualex: a new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence. In: *Applied optics* 43 (23), S. 4488–4496. DOI: 10.1364/AO.43.004488.
- Guan, Senlin; Fukami, Koichiro; Matsunaka, Hitoshi; Okami, Midori; Tanaka, Ryo; Nakano, Hiroshi et al. (2019): Assessing Correlation of High-Resolution NDVI with Fertilizer Application Level and Yield of Rice and Wheat Crops using Small UAVs. In: *Remote Sensing* 11 (2), S. 112. DOI: 10.3390/rs11020112.
- Guanter, Luis; Kaufmann, Hermann; Segl, Karl; Foerster, Saskia; Rogass, Christian; Chabrilat, Sabine et al. (2015): The EnMAP Spaceborne Imaging Spectroscopy Mission for Earth Observation. In: *Remote Sensing* 7 (7), S. 8830–8857. DOI: 10.3390/rs70708830.
- Guidi, Lucia; Tattini, Massimiliano; Landi, Marco (2017): How Does Chloroplast Protect Chlorophyll Against Excessive Light? In: Eduardo Jacob-Lopes, Leila Queiroz Zepka und Maria Isabel Queiroz (Hg.): *Chlorophyll: InTech*.
- Hansen, P. M.; Schjoerring, J. K. (2003): Reflectance measurement of canopy biomass and nitrogen status in wheat crops using normalized difference vegetation indices and partial least squares regression. In: *Remote Sensing of Environment* 86 (4), S. 542–553. DOI: 10.1016/S0034-4257(03)00131-7.
- Hatfield, J. L.; Gitelson, A. A.; Schepers, J. S.; Walthall, C. L. (2008): Application of Spectral Remote Sensing for Agronomic Decisions. In: *Agron.j.* 100 (S3). DOI: 10.2134/agronj2006.0370c.
- Homolová, Lucie; Malenovský, Zbyněk; Clevers, Jan G.P.W.; García-Santos, Glenda; Schaepman, Michael E. (2013): Review of optical-based remote sensing for plant trait mapping. In: *Ecological Complexity* 15, S. 1–16. DOI: 10.1016/j.ecocom.2013.06.003.
- Hu, Juanxiu; He, Dongxian; Yang, Po (2011): Study on Plant Nutrition Indicator Using Leaf Spectral Transmittance for Nitrogen Detection. In: Daoliang Li, Yande Liu und Yingyi Chen (Hg.): *Computer and Computing Technologies in Agriculture IV*, Bd. 347. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (IFIP Advances in Information and Communication Technology), S. 504–513.
- Huang, Shanyu; Miao, Yuxin; Yuan, Fei; Gnyp, Martin; Yao, Yinkun; Cao, Qiang et al. (2017): Potential of RapidEye and WorldView-2 Satellite Data for Improving Rice Nitrogen Status Monitoring at Different Growth Stages. In: *Remote Sensing* 9 (3), S. 227. DOI: 10.3390/rs9030227.
- Imanishi, Junichi; Nakayama, Aki; Suzuki, Yoko; Imanishi, Ayumi; Ueda, Nobuyuki; Morimoto, Yukihiro; Yoneda, Minoru (2010): Nondestructive determination of leaf chlorophyll content in two flowering cherries using reflectance and absorbance spectra. In: *Landscape Ecol Eng* 6 (2), S. 219–234. DOI: 10.1007/s11355-009-0101-8.
- International Society of Precision Agriculture (2022): Home | International Society of Precision Agriculture. Online verfügbar unter <https://www.ispag.org/>, zuletzt aktualisiert am 06.02.2022, zuletzt geprüft am 06.02.2022.
- Jain, Meha; Srivastava, Amit; Balwinder-Singh; Joon, Rajiv; McDonald, Andrew; Royal, Keitasha et al. (2016): Mapping Smallholder Wheat Yields and Sowing Dates Using Micro-Satellite Data. In: *Remote Sensing* 8 (10), S. 860. DOI: 10.3390/rs8100860.
- Jay, Sylvain; Maupas, Fabienne; Bendoula, Ryad; Gorretta, Nathalie (2017): Retrieving LAI, chlorophyll and nitrogen contents in sugar beet crops from multi-angular optical remote sensing: Comparison of vegetation indices and PROSAIL inversion for field phenotyping. In: *Field Crops Research* 210, S. 33–46. DOI: 10.1016/j.fcr.2017.05.005.
- Jia, Liangliang; Yu, Zihui; Li, Fei; Gnyp, Martin; Koppe, Wolfgang; Bareth, Georg et al. (2012): Nitrogen Status Estimation of Winter Wheat by Using an IKONOS Satellite Image in the North China Plain. In: Daoliang Li und Yingyi Chen (Hg.): *Computer and Computing Technologies in Agriculture V*, Bd. 369. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (IFIP Advances in Information and Communication Technology), S. 174–184.

- Jung-Rothenhäusler, F.; Weichelt, Horst; Pach, M. (2008): RAPIDEYE – A NOVEL APPROACH TO SPACE BORNE GEO-INFORMATION SOLUTIONS.
- Kaasalainen, Sanna; Lindroos, Tomi; Hyyppä, Juha (2007): Toward Hyperspectral Lidar: Measurement of Spectral Backscatter Intensity With a Supercontinuum Laser Source. In: *IEEE Geosci. Remote Sensing Lett.* 4 (2), S. 211–215. DOI: 10.1109/LGRS.2006.888848.
- Kajla, Mamta; Yadav, Vinaya Kumar; Khokhar, Jaswant; Singh, Samar; Chhokar, R. S.; Meena, Raj Pal; Sharma, R. K. (2015): Increase in wheat production through management of abiotic stresses : A review. In: *JANS* 7 (2), S. 1070–1080. DOI: 10.31018/jans.v7i2.733.
- Khanal, Sami; KC, Kushal; Fulton, John P.; Shearer, Scott; Ozkan, Erdal (2020): Remote Sensing in Agriculture—Accomplishments, Limitations, and Opportunities. In: *Remote Sensing* 12 (22), S. 3783. DOI: 10.3390/rs12223783.
- Kim, Jeongeun; Kim, Seungwon; Ju, Chanyoung; Son, Hyoung Il (2019): Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Review of Perspective of Platform, Control, and Applications. In: *IEEE Access* 7, S. 105100–105115. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2932119.
- Kitić, Goran; Tagarakis, Aristotelis; Cselyuszka, Norbert; Panić, Marko; Birgermajer, Slobodan; Sakulski, Dušan; Matović, Jovan (2019): A new low-cost portable multispectral optical device for precise plant status assessment. In: *Computers and Electronics in Agriculture* 162, S. 300–308. DOI: 10.1016/j.compag.2019.04.021.
- Knipling, Edward B. (1970): Physical and physiological basis for the reflectance of visible and near-infrared radiation from vegetation. In: *Remote Sensing of Environment* 1 (3), S. 155–159. DOI: 10.1016/S0034-4257(70)80021-9.
- Kokaly, Raymond F.; Asner, Gregory P.; Ollinger, Scott V.; Martin, Mary E.; Wessman, Carol A. (2009): Characterizing canopy biochemistry from imaging spectroscopy and its application to ecosystem studies. In: *Remote Sensing of Environment* 113, S78-S91. DOI: 10.1016/j.rse.2008.10.018.
- Krause, G. H.; Weis, E. (1991): Chlorophyll Fluorescence and Photosynthesis: The Basics. In: *Annu. Rev. Plant. Physiol. Plant. Mol. Biol.* 42 (1), S. 313–349. DOI: 10.1146/annurev.pp.42.060191.001525.
- Kumar, Lalit; Schmidt, Karin; Dury, Steve; Skidmore, Andrew (2001): Imaging Spectrometry and Vegetation Science. In: Freek D. van der Meer und Steven M. de Jong (Hg.): *Imaging Spectrometry: Basic Principles and Prospective Applications*. Dordrecht: Springer Netherlands, S. 111–155.
- Labate, Demetrio; Ceccherini, Massimo; Cisbani, Andrea; Cosmo, Vittorio de; Galeazzi, Claudio; Giunti, Lorenzo et al. (2009): The PRISMA payload optomechanical design, a high performance instrument for a new hyperspectral mission. In: *Acta Astronautica* 65 (9-10), S. 1429–1436. DOI: 10.1016/j.actaastro.2009.03.077.
- Laliberte, Andrea (2009): Unmanned aerial vehicle-based remote sensing for rangeland assessment, monitoring, and management. In: *J. Appl. Remote Sens* 3 (1), S. 33542. DOI: 10.1117/1.3216822.
- Lassaletta, Luis; Billen, Gilles; Grizzetti, Bruna; Anglade, Juliette; Garnier, Josette (2014a): 50 year trends in nitrogen use efficiency of world cropping systems: the relationship between yield and nitrogen input to cropland. In: *Environ. Res. Lett.* 9 (10), S. 105011. DOI: 10.1088/1748-9326/9/10/105011.
- Lassaletta, Luis; Billen, Gilles; Romero, Estela; Garnier, Josette; Aguilera, Eduardo (2014b): How changes in diet and trade patterns have shaped the N cycle at the national scale: Spain (1961–2009). In: *Reg Environ Change* 14 (2), S. 785–797. DOI: 10.1007/s10113-013-0536-1.
- Lemaire, Gilles; Jeuffroy, Marie-Hélène; Gastal, François (2008): Diagnosis tool for plant and crop N status in vegetative stage. In: *European Journal of Agronomy* 28 (4), S. 614–624. DOI: 10.1016/j.eja.2008.01.005.

- Linzon, S. N.; Temple, P. J.; Pearson, R. G. (1979): Sulfur Concentrations in Plant Foliage and Related Effects. In: *Journal of the Air Pollution Control Association* 29 (5), S. 520–525. DOI: 10.1080/00022470.1979.10470822.
- Liu, Jun; van Iersel, Marc W. (2021): Photosynthetic Physiology of Blue, Green, and Red Light: Light Intensity Effects and Underlying Mechanisms. In: *Frontiers in plant science* 12, S. 619987. DOI: 10.3389/fpls.2021.619987.
- Liu, Wei; Zhu, Duan-Wei; Liu, Da-Hui; Geng, Ming-Jian; Zhou, Wen-Bing; Mi, Wei-Jie et al. (2010): INFLUENCE OF NITROGEN ON THE PRIMARY AND SECONDARY METABOLISM AND SYNTHESIS OF FLAVONOIDS IN C HRYSANTHEMUM MORIFOLIUM RAMAT. In: *Journal of Plant Nutrition* 33 (2), S. 240–254. DOI: 10.1080/01904160903434287.
- Loizzo, R.; Daraio, M.; Guarini, R.; Longo, F.; Lorusso, R.; Dini, L.; Lopinto, E. (2019 - 2019): Prisma Mission Status and Perspective. In: IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Yokohama, Japan, 28.07.2019 - 02.08.2019: IEEE, S. 4503–4506.
- Long, Dan S.; Engel, Richard E.; Carpenter, Frank M. (2005): On-Combine Sensing and Mapping of Wheat Protein Concentration. In: *Crop Management* 4 (1), S. 1–9. DOI: 10.1094/CM-2005-0527-01-RS.
- Lu, Ning; Wang, Wenhui; Zhang, Qiaofeng; Li, Dong; Yao, Xia; Tian, Yongchao et al. (2019): Estimation of Nitrogen Nutrition Status in Winter Wheat From Unmanned Aerial Vehicle Based Multi-Angular Multispectral Imagery. In: *Frontiers in plant science* 10, S. 1601. DOI: 10.3389/fpls.2019.01601.
- Magney, Troy S.; Eitel, Jan U. H.; Vierling, Lee A. (2017): Mapping wheat nitrogen uptake from RapidEye vegetation indices. In: *Precision Agric* 18 (4), S. 429–451. DOI: 10.1007/s11119-016-9463-8.
- Malchikov, N. O.; Pisman, T. I.; Botvich, I. Yu; Emelyanov, D. V.; Vagner, V. V.; Shevrynogov, A. P. (2021): The use of the data derived from the PlanetScope satellite and unmanned aerial vehicles to estimate crop yield as dependent on the amount of nitrogen fertilizer applied. In: *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 839 (2), S. 22004. DOI: 10.1088/1755-1315/839/2/022004.
- Martínez-Dalmau, Javier; Berbel, Julio; Ordóñez-Fernández, Rafaela (2021): Nitrogen Fertilization. A Review of the Risks Associated with the Inefficiency of Its Use and Policy Responses. In: *Sustainability* 13 (10), S. 5625. DOI: 10.3390/su13105625.
- Mats Söderström; Henrik Stadig; Johan Martinsson; Kristin Pikki; Maria Stenberg (2016): CropSAT – A public satellite-based decision support system for variable-rate nitrogen fertilization in Scandinavia.
- Meng, Ran; Dennison, Philip E. (2015): Spectroscopic Analysis of Green, Desiccated and Dead Tamarisk Canopies. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 81 (3), S. 199–207. DOI: 10.14358/PERS.81.3.199.
- MILFORD, G. F. J.; POCOCK, T. O.; JAGGARD, K. W.; BISCOE, P. V.; ARMSTRONG, M. J.; LAST, P. J.; GOODMAN, P. J. (1985): An analysis of leaf growth in sugar beet. In: *Ann Applied Biology* 107 (2), S. 335–347. DOI: 10.1111/j.1744-7348.1985.tb01578.x.
- Modak, Jayant M. (2002): Haber process for ammonia synthesis. In: *Reson* 7 (9), S. 69–77. DOI: 10.1007/BF02836187.
- Mulla, David J. (2013): Twenty five years of remote sensing in precision agriculture: Key advances and remaining knowledge gaps. In: *Biosystems Engineering* 114 (4), S. 358–371. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2012.08.009.
- Muñoz-Huerta, Rafael F.; Guevara-Gonzalez, Ramon G.; Contreras-Medina, Luis M.; Torres-Pacheco, Irineo; Prado-Olivarez, Juan; Ocampo-Velazquez, Rosalia V. (2013): A review

- of methods for sensing the nitrogen status in plants: advantages, disadvantages and recent advances. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 13 (8), S. 10823–10843. DOI: 10.3390/s130810823.
- Novichonok, E. V.; Novichonok, A. O.; Kurbatova, J. A.; Markovskaya, E. F. (2016): Use of the atLEAF+ chlorophyll meter for a nondestructive estimate of chlorophyll content. In: *Photosynth.* 54 (1), S. 130–137. DOI: 10.1007/s11099-015-0172-8.
- NPD Group (2017): Premium drones drive steady sales, while lower cost drones fly off shelves during the holidays. Hg. v. NPD Group. Online verfügbar unter <https://goo.gl/WwQF6P>.
- Padilla, Francisco M.; Gallardo, Marisa; Peña-Fleitas, M. Teresa; Souza, Romina de; Thompson, Rodney B. (2018a): Proximal Optical Sensors for Nitrogen Management of Vegetable Crops: A Review. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 18 (7). DOI: 10.3390/s18072083.
- Padilla, Francisco M.; Souza, Romina de; Peña-Fleitas, M. Teresa; Gallardo, Marisa; Giménez, Carmen; Thompson, Rodney B. (2018b): Different Responses of Various Chlorophyll Meters to Increasing Nitrogen Supply in Sweet Pepper. In: *Frontiers in plant science* 9, S. 1752. DOI: 10.3389/fpls.2018.01752.
- Padilla, Francisco M.; Teresa Peña-Fleitas, M.; Gallardo, Marisa; Thompson, Rodney B. (2014): Evaluation of optical sensor measurements of canopy reflectance and of leaf flavonols and chlorophyll contents to assess crop nitrogen status of muskmelon. In: *European Journal of Agronomy* 58, S. 39–52. DOI: 10.1016/j.eja.2014.04.006.
- Pascucci, S.; Pignatti, S.; Casa, R.; Darvishzadeh, R.; Huang, W. (2021): Hyperspectral Remote Sensing of Agriculture and Vegetation. Basel, Switzerland: MDPI - Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Online verfügbar unter <https://books.google.de/books?id=jCsWEAAAQBAJ>.
- Pascucci, Simone; Pignatti, Stefano; Casa, Raffaele; Darvishzadeh, Roshanak; Huang, Wenjiang (2020): Special Issue “Hyperspectral Remote Sensing of Agriculture and Vegetation”. In: *Remote Sensing* 12 (21), S. 3665. DOI: 10.3390/rs12213665.
- Pederi, Y. A.; Cheporniuk, H. S. (2015 - 2015): Unmanned Aerial Vehicles and new technological methods of monitoring and crop protection in precision agriculture. In: 2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). 2015 IEEE International Conference Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD). Kyiv, Ukraine, 13.10.2015 - 15.10.2015: IEEE, S. 298–301.
- Peltonen, J.; Virtanen, A.; Haggrèn, E. (1995): Using a Chlorophyll Meter to Optimize Nitrogen Fertilizer Application for Intensively-Managed Small-Grain Cereals. In: *J Agron Crop Sci* 174 (5), S. 309–318. DOI: 10.1111/j.1439-037X.1995.tb01118.x.
- Peñuelas, J.; Gamon, J. A.; Fredeen, A. L.; Merino, J.; Field, C. B. (1994): Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. In: *Remote Sensing of Environment* 48 (2), S. 135–146. DOI: 10.1016/0034-4257(94)90136-8.
- Pinheiro, Fabricio; Gusmo dos Anjos, Wagner de Paula (2014): Optical Sensors Applied in Agricultural Crops. In: Moh. Yasin (Hg.): *Optical Sensors - New Developments and Practical Applications: InTech*.
- PINTER, P. J.; JACKSON, R. D.; IDSO, S. B.; REGINATO, R. J. (1981): Multidate spectral reflectance as predictors of yield in water stressed wheat and barley. In: *International Journal of Remote Sensing* 2 (1), S. 43–48. DOI: 10.1080/01431168108948339.
- Plant-O-Meter (2021). Online verfügbar unter <https://www.plant-o-meter.com/>, zuletzt aktualisiert am 10.12.2021, zuletzt geprüft am 06.02.2022.
- Powell, Charles C.; Lindquist, Richard Kenneth (op. 1997): *Ball pest & disease manual. Disease, insect, and mite control on flower and foliage crops.* 2nd ed. Batavia (Illinois): Ball Publishing.

- Prost, Lorène; Jeuffroy, Marie-Hélène (2007): Replacing the nitrogen nutrition index by the chlorophyll meter to assess wheat N status. In: *Agron. Sustain. Dev.* 27 (4), S. 321–330. DOI: 10.1051/agro:2007032.
- Rast, M.; Nieke, J.; Adams, J.; Isola, C.; Gascon, F. (2021): Copernicus Hyperspectral Imaging Mission for the Environment (Chime). In: 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium IGARSS. IGARSS 2021 - 2021 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Brussels, Belgium, 11.07.2021 - 16.07.2021: IEEE, S. 108–111.
- Read, J. J.; Tarpley, L.; McKinion, J. M.; Reddy, K. R. (2002): Narrow-waveband reflectance ratios for remote estimation of nitrogen status in cotton. In: *Journal of environmental quality* 31 (5), S. 1442–1452. DOI: 10.2134/jeq2002.1442.
- Reckleben, Yves (2014): Sensoren für die Stickstoffdüngung - Erfahrungen in 12 Jahren praktischem Einsatz. 1,41 MB / Journal für Kulturpflanzen 66(2) 2014. DOI: 10.5073/JFK.2014.02.02.
- Richards, J. I. (1992): Transferring technologies for agricultural development in the Third World. In: *IAEA Bulletin* 34 (4), S. 9–16. Online verfügbar unter http://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=RN:24018909.
- Robertson, Michael; Carberry, Peter; Brennan, Lisa (2007): The Economic Benefits of Precision Agriculture: Case Studies from Australian Grain Farms. In: *Crop and Pasture Science* 60.
- Robin Gebbers (2014): Current Crop and Soil Sensors for Precision Agriculture.
- Saberioon, M.; Amin, M. S. M.; Gholizadeh, A.; Ezrin, M. H. (2014): A Review of Optical Methods for Assessing Nitrogen Contents during Rice Growth. In: *Appl. Eng. Agric.* S. 657–669. DOI: 10.13031/aea.30.10478.
- Schaumberger, Andreas; Schellberg, Jürgen; Hollberg, Jens (2015): Spektrometrie - moderne, nicht-invasive Erfassungstechnik von Pflanzenbeständen.
- Scheer, Hugo (Hg.) (1991): Chlorophylls. Chemical Rubber Company. Boca Raton, Fla.: CRC Pr.
- Schepers, J. S.; Blackmer, T. M.; Wilhelm, W. W.; Resende, M. (1996): Transmittance and Reflectance Measurements of Corn Leaves from Plants with Different Nitrogen and Water Supply. In: *Journal of Plant Physiology* 148 (5), S. 523–529. DOI: 10.1016/S0176-1617(96)80071-X.
- Schepers, J. S.; Mosier, A. R. (1991): Accounting for Nitrogen in Nonequilibrium Soil-Crop Systems. In: R. F. Follett, D. R. Keeney und R. M. Cruse (Hg.): *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*. Madison, WI, USA: Soil Science Society of America, S. 125–138.
- Schlichting, Alessana F.; Bonfim-Silva, Edna M.; Silva, Matheus de C.; Pietro-Souza, William; Da Silva, Tonny J. A.; Farias, Lorraine do N. (2015): Efficiency of portable chlorophyll meters in assessing the nutritional status of wheat plants. In: *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* 19 (12), S. 1148–1151. DOI: 10.1590/1807-1929/agriambi.v19n12p1148-1151.
- Sebilo, Mathieu; Mayer, Bernhard; Nicolardot, Bernard; Pinay, Gilles; Mariotti, André (2013): Long-term fate of nitrate fertilizer in agricultural soils. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 110 (45), S. 18185–18189. DOI: 10.1073/pnas.1305372110.
- Segarra, Joel; Buchailot, Maria Luisa; Araus, Jose Luis; Kefauver, Shawn C. (2020): Remote Sensing for Precision Agriculture: Sentinel-2 Improved Features and Applications. In: *Agronomy* 10 (5), S. 641. DOI: 10.3390/agronomy10050641.
- Sharifi, Alireza (2020): Using Sentinel-2 Data to Predict Nitrogen Uptake in Maize Crop. In: *IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observations Remote Sensing* 13, S. 2656–2662. DOI: 10.1109/JSTARS.2020.2998638.

- Shaver, T. M.; Khosla, R.; Westfall, D. G. (2011): Evaluation of two crop canopy sensors for nitrogen variability determination in irrigated maize. In: *Precision Agric* 12 (6), S. 892–904. DOI: 10.1007/s11119-011-9229-2.
- Shaver, T. M.; Kruger, G. R.; Rudnick, D. R. (2017): Crop canopy sensor orientation for late season nitrogen determination in corn. In: *Journal of Plant Nutrition* 40 (15), S. 2217–2223. DOI: 10.1080/01904167.2017.1346681.
- She; Ehsani, Reza; Leiva, Josué; Leiva, Josue; Owen Jr, James (2014): Applications of small UAV systems for tree and nursery inventory management.
- Sinclair, Thomas R.; Ruffy, Thomas W. (2012): Nitrogen and water resources commonly limit crop yield increases, not necessarily plant genetics. In: *Global Food Security* 1 (2), S. 94–98. DOI: 10.1016/j.gfs.2012.07.001.
- Sivarajan, Saravanan; Maharlooei, Mohammadmehdi; Kandel, Herman; Buetow, Ryan R.; Nowatzki, John; Bajwa, Sreekala G. (2020): Evaluation of OptRx™ active optical sensor to monitor soybean response to nitrogen inputs. In: *J. Sci. Food Agric.* 100 (1), S. 154–160. DOI: 10.1002/jsfa.10008.
- Skiba, U. (2014): Nitrous oxide, climate change and agriculture. In: *CAB Reviews* 9 (010). DOI: 10.1079/PAVSNNR20149010.
- Snowball, K.; Robson, A. D. (1991): Nutrient deficiencies and toxicities in wheat. A guide for field identification. México: CIMMYT Centro Intern. de Mejoramiento de Maiz y Trigo.
- Söderström, Mats; Nissen, Knud; Gustafsson, K.; Börjesson, Thomas; Jonsson, Anders; Wijkmark, L. (2004): Swedish Farmers' Experiences of the Yara N-Sensor 1998-2003.
- Söderström, Mats; Piikki, Kristin; Stenberg, Maria; Stadig, Henrik; Martinsson, Johan (2017): Producing nitrogen (N) uptake maps in winter wheat by combining proximal crop measurements with Sentinel-2 and DMC satellite images in a decision support system for farmers. In: *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B — Soil & Plant Science* 67 (7), S. 637–650. DOI: 10.1080/09064710.2017.1324044.
- Tewes, Andreas; Thonfeld, Frank; Schmidt, Michael; Oomen, Roelof; Zhu, Xiaolin; Dubovyk, Olena et al. (2015): Using RapidEye and MODIS Data Fusion to Monitor Vegetation Dynamics in Semi-Arid Rangelands in South Africa. In: *Remote Sensing* 7 (6), S. 6510–6534. DOI: 10.3390/rs70606510.
- The council of the european communities (1991): COUNCIL DIRECTIVE of 12 December 1991: Concerning the protection of waters against pollution caused by nitrates from agricultural sources. (91/676/EEC). Hg. v. European Union. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:01991L0676-20081211&from=EN>.
- Thenkabail, Prasad; Smith, R. B.; Pauw, Eddy de (2002): Evaluation of Narrowband and Broadband Vegetation Indices for Determining Optimal Hyperspectral Wavebands for Agricultural Crop Characterization. In: *PE & RS- Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68, S. 607–621.
- Tilman, David; Cassman, Kenneth G.; Matson, Pamela A.; Naylor, Rosamond; Polasky, Stephen (2002): Agricultural sustainability and intensive production practices. In: *Nature* 418 (6898), S. 671–677. DOI: 10.1038/nature01014.
- Toutin; Cheng, Philip (2002): QuickBird – A Milestone for High Resolution Mapping. In: *Earth Observation Magazine* 11.
- Tremblay, Nicolas (2001): Nitrogen management in field vegetables. A guide to efficient fertilisation. Ottawa, Ont.: Depository Services Program (Canada).
- Tremblay, Nicolas; Wang, Zhijie; Cerovic, Zoran G. (2012): Sensing crop nitrogen status with fluorescence indicators. A review. In: *Agron. Sustain. Dev.* 32 (2), S. 451–464. DOI: 10.1007/s13593-011-0041-1.
- Tremblay, Nicolas; Wang, Zhijie; Ma, Bao-Luo; Belec, Carl; Vigneault, Philippe (2009): A comparison of crop data measured by two commercial sensors for variable-rate nitrogen application. In: *Precision Agric* 10 (2), S. 145–161. DOI: 10.1007/s11119-008-9080-2.

- Ulissi, Valentina; Antonucci, Francesca; Benincasa, Paolo; Farneselli, Michela; Tosti, Giacomo; Guiducci, Marcello et al. (2011): Nitrogen concentration estimation in tomato leaves by VIS-NIR non-destructive spectroscopy. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 11 (6), S. 6411–6424. DOI: 10.3390/s110606411.
- Vogt, T. (2017): UTM exploration: testing mobile connectivity for integrating UAS. In: *RPAS 2017 and European RPAS Policy, Regulatory & Innovation Forum, 13-14 June, Brussels*. 2017.
- Walsh, Olga S.; Shafian, Sanaz; Marshall, Juliet M.; Jackson, Chad; McClintick-Chess, Jordan R.; Blanscet, Steven M. et al. (2018): Assessment of UAV Based Vegetation Indices for Nitrogen Concentration Estimation in Spring Wheat. In: *ARS* 07 (02), S. 71–90. DOI: 10.4236/ARS.2018.72006.
- Wang, Zhao-Hui; Li, Sheng-Xiu; Malhi, Sukhdev (2008): Effects of fertilization and other agronomic measures on nutritional quality of crops. In: *J. Sci. Food Agric.* 88 (1), S. 7–23. DOI: 10.1002/jsfa.3084.
- Ward, Mary H. (2009): Too much of a good thing? Nitrate from nitrogen fertilizers and cancer. In: *Reviews on environmental health* 24 (4), S. 357–363. DOI: 10.1515/reveh.2009.24.4.357.
- World Food and Agriculture - Statistical Yearbook 2020 (2020): FAO.
- Yadegari, Mohammad; Shamshiri, Redmond R.; Mohamed Shariff, Abdul Rashid; Balasundram, Siva K.; Mahns, Benjamin (2020): Using SPOT-7 for Nitrogen Fertilizer Management in Oil Palm. In: *Agriculture* 10 (4), S. 133. DOI: 10.3390/agriculture10040133.
- Yang, Di; Su, Hongbo; Yong, Yan (end_day="05" end_month="07" end_year="2015" start_day="22" start_month="06" start_year="2015"): MODIS-Landsat Data Fusion for Estimating Vegetation Dynamics - A Case Study for Two Ranches in Southwestern Texas. In: *Proceedings of 1st International Electronic Conference on Remote Sensing*. 1st International Electronic Conference on Remote Sensing. Sciforum.net, end_day="05" end_month="07" end_year="2015" start_day="22" start_month="06" start_year="2015". Basel, Switzerland: MDPI, d016.
- YANG, Chenghai (2018): High resolution satellite imaging sensors for precision agriculture. In: *Front. Agr. Sci. Eng.* 0 (0), S. 0. DOI: 10.15302/J-FASE-2018226.
- Yao, Huang; Qin, Rongjun; Chen, Xiaoyu (2019): Unmanned Aerial Vehicle for Remote Sensing Applications—A Review. In: *Remote Sensing* 11 (12), S. 1443. DOI: 10.3390/rs11121443.
- Yara United Kingdom (2017): Yara N-Sensor ALS 2 - The ultimate in tractor mounted precision nitrogen management tools | Yara UK. Online verfügbar unter <https://www.yara.co.uk/crop-nutrition/farmers-toolbox/n-sensor/>, zuletzt aktualisiert am 01.12.2017, zuletzt geprüft am 06.02.2022.
- Zhang, Jiayi; Wang, Weikang; Krienke, Brian; Cao, Qiang; Zhu, Yan; Cao, Weixing; Liu, Xiaojun (2021): In-season variable rate nitrogen recommendation for wheat precision production supported by fixed-wing UAV imagery. In: *Precision Agric.* DOI: 10.1007/s11119-021-09863-2.
- Zhang, Ke; Liu, Xiaojun; Ma, Yong; Zhang, Rui; Cao, Qiang; Zhu, Yan et al. (2019): A Comparative Assessment of Measures of Leaf Nitrogen in Rice Using Two Leaf-Clip Meters. In: *Sensors (Basel, Switzerland)* 20 (1). DOI: 10.3390/s20010175.
- Zhang, Yongping; Tremblay, Nicolas; Zhu, Juanjuan (2012): A first comparison of Multiplex (R) for the assessment of corn nitrogen status. In: *Journal of Food, Agriculture and Environment* 10, S. 1008–1016.
- Zhang, Yun; Kerle, Norman (2008): Satellite remote sensing for near-real time data collection. In: S. 75–102.

贾南, Shah Jahan; Wahocho, Niaz; Laghari, Ghulam; Laghari, Abdul; Bhabhan, Ghulam; Hussain Talpur, Khalid et al. (2016): Role of Nitrogen for Plant Growth and Development: A review. In: *Advances in Environmental Biology* 10, S. 209–218.