



Kapitel 3

Chapter 3

Fernerkundung

Remote sensing

3.1 Fernerkundung - eine Zukunftstechnologie im Präzisionspflanzenbau

Prof. Dr. W. Kühbauch, Lehrstuhl für Allgemeinen Pflanzenbau, Universität Bonn

3.1.1 Zusammenfassung

Im Beitrag werden technische Prinzipien der Fernerkundung (FE) mit optischen Sensoren und Radar erläutert. Mit Anwendungsbeispielen der Satelliten- und Flugzeugfernerkundung wird der technische Fortschritt von Satellitensystemen vorgestellt und das Anwendungspotential der Fernerkundung im Präzisionspflanzenbau (PP) aufgezeigt wird.

Als praktische Vorteile sind für den PP durch den Einsatz der FE unter anderem absehbar:

- Auffinden von Teilflächen mit abnormem Erscheinungsbild; frühe Erfassung von Mängeln in Pflanzenbeständen und Ursachenermittlung vor Ort,
- bessere Unterteilung der Flächen in einheitliche Bewirtschaftungszonen als z.B. mit Bodenkarten oder Bodenuntersuchungen,
- fortlaufende Kartierung der Ausbreitung von Krankheiten und Schädlingen; strategische Verbesserung und Optimierung der Kontrollmaßnahmen
- fortlaufende oder stadienbezogene Kartierung des Stickstoff-Bedarfs der Pflanzen; strategische Verbesserung und Optimierung der Düngung (auch andere Dünger, Bodenverbesserer etc.),
- laufende Erfolgskontrolle aller Maßnahmen in den Flächen.

Wichtig für eine erfolgreiche Einführung der Fernerkundung in den Präzisionspflanzenbau wird sein, dass die Landwirte mit möglichst fertigen Produkten beliefert werden und bei der Übersetzung von Fernerkundungsdaten in feldbezogene Anwendungen die Betreiber von Satellitensystemen und Fachberater in der Landwirtschaft zusammenwirken.

Summary

Remote Sensing – A Future Technology in Precision Farming

The paper explains the principles of remote sensing that is based on optical sensors and radar. Progress in satellite and air borne remote sensing is demonstrated with special reference to its future potential in applied precision farming.

Foreseeable advantages in precision farming that can be achieved by remote sensing are:

- tracing target areas with abnormal appearance; early recording of hidden faults in field crops and on site identification of their causes
- improved partitioning of fields into zones of uniform crop management
- continued mapping of the spatial expansion of diseases and pest in field crops throughout the growing season; strategic revision and enhancement of measures of pest control.
- continuous or discontinuous, stage dependent mapping of the crop nutrient demand, e.g. nitrogen; strategic revision and enhancement of measures of fertiliser application
- successive control of the effectiveness of crop management measures

A successful introduction of remote sensing in precision farming depends on the availability of ready to use products for the farmers. In order to transform remote sensing data in practicable site specific applications a close co-operation between the operators of satellite systems and agro-consultants will be necessary.

3.1.2 Präzisionspflanzenbau

Zustand und Erscheinungsbild der nutzbaren Böden der Erde, ja selbst ihrer Eis- und Wasserflächen sind weder in der Zeit noch in der Fläche oder räumlich gesehen gleichbleibend oder homogen. Dasselbe gilt für individuelle Acker- oder Grünlandschläge. Der Normalzustand eines Schlages ist nach allen uns zur Verfügung stehenden Kriterien die Heterogenität.

Vorübergehend gab es wohl die Auffassung, dass landwirtschaftlich genutzte Flächen mit technischen Mitteln egalisiert werden können. Aber selbst Ackerschläge, die z.B. mit nur einer Bodenart vollständig rekultiviert wurden, sind zu keinem Zeitpunkt danach homogen. Mittlerweile ist die Inhomogenität auch für kleine Ackerschläge akzeptiert; man setzt den Teilschlag als Zielobjekt vor den Schlag. Teilflächenspezifische Maßnahmen zielen folgerichtig primär nicht darauf, Unterschiede auszugleichen, sondern darauf, diese dem Teilschlag anzupassen und sich auf dessen Ertragspotential einzustellen. Der Präzisionspflanzenbau (PP) berücksichtigt die räumliche und zeitliche Dimension der Veränderung von Pflanzenbeständen in Verbindung mit ökologischen und ökonomischen Vorgaben. Die Schlüsseltechnologien im PP sind (1) Ortungssysteme zur Georeferenzierung bei der Zustandserfassung in Pflanzenbeständen sowie der Umsetzung und Dokumentation pflanzenbaulicher Maßnahmen von der Saat bis zur Ernte, (2) Präzisionsverfahren der räumlich exakten Zustandserfassung von Pflanzenbeständen und Böden, (3) Präzisionstechniken zur Umsetzung pflanzenbaulicher Maßnahmen, (4) Geoinformationssysteme (GIS), in denen sämtliche Vorgänge von der Zustandserfassung bis zur Umsetzung einer pflanzenbaulichen Maßnahme mit eindeutigem Ortsbezug verknüpft und dokumentiert werden.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt liegt die Präzision der für die Erfassung verschiedener Zustände aber auch der für die Umsetzung pflanzenbaulicher Maßnahmen verfügbaren Techniken zum Teil weit auseinander. Die Fernerkundung (FE) stand bis vor wenigen Jahren außerhalb nahezu aller für den PP in Betracht kommenden Dimensionen; d.h., sowohl die räumliche als auch die zeitliche und spektrale Auflösung der FE-Systeme waren unzulänglich.

3.1.3 Fernerkundung

3.1.3.1 Prinzip

Auf einige Besonderheiten der FE-Systeme, die den landwirtschaftlichen Pflanzenbau und den PP betreffen ist an dieser Stelle hinzuweisen:

- (1) die FE operiert berührungslos von weit entfernten Plattformen; z.B. Satelliten oder Flugzeugen,
- (2) die FE-Sensoren (Scanner) erzeugen Signale, aus denen Bilder erst generiert werden müssen,
- (3) die abgebildeten Signale integrieren zeitgleich verschiedene biologische und physikalische Zustände in einem Signal,
- (4) die FE hat (noch) keinen Zugang zu Online-Verfahren.

Diese Besonderheiten haben Konsequenzen für die Datengewinnung, die Aufbereitung der Daten und den Umgang mit ihnen. Erfasst werden immer Phänomene, nicht Ursachen; die Kausalanalyse obliegt dem Anwender. Die Erzeugung von Bildern mit ortsgenauen Informationen ist mit erheblichen Aufwendungen verbunden, z.B. Korrekturen für unterschiedliche Beobachtungswinkel, Georeferenzierung, Filterungen, Atmosphärenkorrektur etc. Aufgrund der Vielfalt der Systeme und Systembetreiber, aber auch weil es noch keinen ergiebigen



Markt gibt, fehlt es weitgehend an Auswerteroutinen. Schnellen Auswerteroutinen wird im PP eine Schlüsselrolle zukommen.

Den PP interessiert, welche Eigenschaften von Pflanzen und Böden mit FE erfasst werden können. Hier müssen wir trennen zwischen der FE mit optischen Sensoren im VIS und IR im Nanometer-Bereich des elektromagnetischen Spektrums und Mikrowellensensoren (Radar), die im Zentimeter-Bereich operieren.

3.1.3.2 Fernerkundung mit optischen Sensoren und Radar

Optische Sensoren erfassen das vom betrachteten Objekt reflektierte Sonnenlicht. Radar-Systeme senden (aktiv) polarisierte gepulste Wellen und empfangen das Rückstreusignal, wobei die räumliche Auflösung der angestrahlten Objekte am Boden über die Laufzeitunterschiede der Wellen geschieht.

Die vom Sensor empfangene Signalstärke eines Pflanzenbestandes hängt bei der optischen FE von der Stärke der Reflexion oder Absorption des Sonnenlichtes (und dem Atmosphären-einfluss) ab. Die von den Radar-Sensoren empfangene Signalstärke hängt ab von der Dämpfung, Streuung und Polarisationsänderung der eingestrahlten Wellen am und im Pflanzenbestand. Radar ist als aktives System tag- und nachtauglich und weitgehend wetterunabhängig. Die unterschiedlichen Eigenschaften der optischen und der Radarwellen lassen unterschiedliche Eigenschaften der Pflanzen erfassen (Tab. 3.1-1).

Tab. 3.1-1: Merkmale von Pflanzenbeständen mit Einfluss auf die spektrale Reflexion im Bereich von optischen Wellen (VIS und IR) und Radar

VIS und IR (λ , θ , Φ)	Radar (λ , θ , ρ , Φ)
-Pigmentzusammensetzung ¹⁾	-Volumen (Wuchshöhe) ¹⁾
-Pigmentkonzentration ¹⁾	-vertikale und horizontale Verteilung von Pflanzenorganen ¹⁾
-Turgeszenz ²⁾	-Größe, Form und Orientierung von Pflanzenorganen
-Zellstruktur ²⁾	-Verteilung der Biomasse und Phänologie ¹⁾
-Seneszenz ^{1) 2)}	-Reihenrichtung
-Phänologie ^{1) 3)}	-Bodenrauigkeit
-Blattflächenindex ³⁾	-Bodenfeuchtigkeit
-Bodenfarbe ⁴⁾	
-Bodenfeuchtigkeit ⁴⁾	

λ = Wellenlänge; θ = Einfallswinkel; ρ = Polarisation; Φ = Azimutwinkel (Blickrichtung); ^{1) - 4)} abhängige Größen

Die optische FE spricht z.B. sehr gut auf die Pigmentkonzentration und die Wasserkonzentration (Turgor) in der Vegetationsdecke an. Geschlossene, vitale Pflanzenbestände zeigen starke Absorption im blauen und roten Spektralbereich und turgeszenzbedingt starke Reflexion im NIR. Weil Böden sich quasi umgekehrt verhalten, je nach Bodenart und Bodenfeuchte mit relativ hoher Reflexion im VIS und schwächerer Reflexion im NIR, kann mit optischen Signalen bis zu einem gewissen Sättigungswert der Bestandesaufbau der Fruchtarten rekonstruiert werden. Man bedient sich dazu häufig sog. Vegetationsindizes. Bewährt hat sich z.B. der „Rote NDVI“ - Normierte Differenz des Vegetationsindex = $NDVI = \frac{R(NIR) - R(Rot)}{R(NIR) + R(Rot)}$. Darüber hinaus werden in der Literatur zahlreiche Vegetationsindizes beschrieben, mit denen bestimmte Eigenschaften von Pflanzen mehr oder weniger selektiv erfasst werden können (Gitelsen, 2001).

Die Radarwellen dringen je nach Wellenlänge mehr oder weniger tief in den Pflanzenbestand ein, lange Wellen tiefer als kurze, und reagieren mit dessen Volumen und Strukturelementen, Blättern und Halmen. Die Orientierung der Strukturen und die darin mehr horizontal oder vertikal verteilte Wassermasse haben entscheidenden Einfluss, wie stark das Radarsignal zurückgestreut oder gedämpft wird. Nur mit sehr flachen Einfallswinkeln und kurzen Wellen (z.B. X-Band) darf angenommen werden, dass das vom Sensor empfangene Signal ein reines Pflanzensignal repräsentiert. Langwelliges Radar und steile Einfallswinkel führen dagegen auch in vollständig deckenden Vegetationsschichten zu einem Mischsignal aus Boden und Pflanzenmasse (Ulaby et al., 1982). Diese komplexen Verhältnisse erschweren das Verständnis der Radarsignale.

Der Vorteil der optischen FE ist ihre relativ gute Interpretierbarkeit: Niedrige NDVI-Werte weisen auf eine dünne oder seneszenten Pflanzendecke oder auf Stickstoff- oder Wassermangel hin. Kennt man die Zeit der Aufnahme, die Fruchtart und die Witterungs- und Bodenverhältnisse, ergibt sich aus dem FE-Signal oft schon eine schlüssige Information oder man kontrolliert am Boden die Ursache anhand der oft guten räumlichen Abgrenzung des Signals. Ein weiterer Vorteil der optischen FE: bereits mit einzelnen Szenen (z.B. in der Hauptvegetationsperiode) ist mit pixelweiser Auswertung eine Unterscheidung von Schlägen und Teilschlägen möglich. Der große Nachteil der optischen FE ist, dass sie bei Nacht und Bewölkung nicht funktioniert. In der Vergangenheit entstanden deshalb in humiden Gebieten mit den bekannten Satellitensystemen wie LANDSAT und SPOT zu große Lücken in den aufeinanderfolgenden Aufnahmen, um sie erfolgreich in der Bestandesbeobachtung oder zur Fruchtartenklassifikation einsetzen zu können. Mit Flugzeugen kann man zwar unter der Wolkendecke fliegen, eine für den PP hinreichende zeitliche Auflösung ist aber damit nicht bezahlbar.

Der Vorteil der Radar-FE ist die Nachttauglichkeit und die weitgehende Unabhängigkeit von der Bewölkung. Dies führt zu relativ zuverlässigen Wiederholraten der Aufnahmen. Ein Vorteil der Radar-FE ist auch, dass die Mikrowellen sehr gut auf die frische Biomasse ansprechen (s. unten). Dem stehen jedoch Nachteile gegenüber: Die relativ „schwierige“ Physik wurde bereits erwähnt. Zu dieser Physik gehört, dass sich benachbarte Radarwellen gegenseitig verstärken oder auslöschen können. Das führt zum sog. „Speckle“, der die Aufnahmen so stark verrauscht, dass pixelweise Bildauswertung für landwirtschaftliche Flächen kaum in Frage kommt und kleine Strukturen u. U. völlig unterdrückt werden. Selbst multitemporale Aufnahmen mit Radar bilden weniger scharf ab als eine einzige Aufnahme mit optischen Sensoren (Abb. 3.1-1, s. Anhang). Mit aufwendigen Filterprozeduren und integraler Auswertung der Flächen können die Ergebnisse verbessert werden (s. unten). Für den PP, in dem für ausreichende zeitliche Auflösung rasche Auswerteroutinen benötigt werden, verdient die schwierigere Radarphysik besondere Aufmerksamkeit.

3.1.4 Fernerkundung im PP

PP findet in Teilbereichen des landwirtschaftlichen Pflanzenbaus bereits ohne die FE statt. Für eine Reihe von teilschlagspezifischen Maßnahmen wird auf absehbare Zeit oder überhaupt die FE nicht konkurrenzfähig oder erforderlich sein. So wird die Erkennung von Unkrautarten den digitalen Kameras vorbehalten bleiben, weil hier räumliche Auflösungen bis in den Millimeterbereich benötigt werden, z.B. um mit den aus Binärbildern gewonnen Konturen eine Fourier-Analyse durchführen zu können (Sökefeld et al., 2000). Auch der Hydro-N-Sensor funktioniert im Nahbereich (Hege und Reusch, 1996).

Bodennah geführte Sensoren können jedoch nicht beliebig oft auf die Reise geschickt werden. Hier liegt der Vorteil und die künftige Verwendung der FE im PP. Das Erscheinungsbild der Pflanzenbestände und die Dauer und Abfolge der für pflanzenbauliche Maßnahmen in Frage kommenden Zeitfenster variieren von Jahr zu Jahr und zwischen den Fruchtarten. Nur die FE, vor allem die Satelliten-FE hat das Potential, in genügend enger Folge diese dynamischen Veränderungen in den Feldschlägen in ihrer räumlichen Ausdehnung zu erfassen und den Erfolg einer pflanzenbaulichen Maßnahme kurzfristig zu beobachten.

Vorstellen kann man sich den Beitrag der FE im PP als eine Art „taktische Feldinspektion“ (Blakeman, 2002). Der Landwirt erkennt z. B. die Symptome von Nährstoffmangel oder Krankheiten aber es fehlen Informationen darüber, wann diese im Pflanzenbestand erstmals auftreten und welchen Flächenumfang das Phänomen einnimmt. Folgende praktische Vorteile sind für den PP durch den Einsatz der FE absehbar:

- Auffinden von Teilflächen mit abnormem Erscheinungsbild - Ursachenermittlung in frühen Entwicklungsstadien vor Ort,
- bessere Unterteilung der Flächen in einheitliche Bewirtschaftungszonen als z. B. mit Bodenkarten oder Bodenuntersuchungen,
- fortlaufende Kartierung der Ausbreitung von Krankheiten und Schädlingen, - strategische Verbesserung und Optimierung der Kontrollmaßnahmen,
- fortlaufende oder stadienbezogene Kartierung des Stickstoff-Bedarfs der Pflanzen - strategische Verbesserung und Optimierung der Düngung (auch andere Dünger, Bodenverbesserer etc.),
- laufende Erfolgskontrolle aller Maßnahmen in den Flächen,
- etc.

Zur Zeit stützen sich Düngung und Pflanzenschutz fast ausschließlich auf die Erfahrung des Landwirtes, seine Feldinspektionen, Stichproben von Boden- und Pflanzenmaterial. Viele dieser Beobachtungen sind räumlich und zeitlich nicht sehr detailliert. Die prinzipiellen Möglichkeiten, mit Hilfe der FE eine bessere Information zu beziehen, wurde in zahlreichen Projekten demonstriert.

Mit Luftbildern und Satellitenaufnahmen kann die Variation von Vegetation und Bodenverhältnissen kartiert werden. Solche Aufnahmen liefern Retrospektiven, die für den Anbau und die Behandlung der nächsten Fruchtart berücksichtigt werden können; ähnlich wie die Ertragskarten von Mähreschern, die mit Ertragssensoren und GPS ausgerüstet sind (Auernhammer und Demmel, 1998). Die Unkrautausbreitung, das Auftreten von Krankheiten und Schädlichen, Nährstoff- und Wassermangel waren und sind Gegenstand fernerkundlicher Inventuren (Blakeman, 2002; Brown et al., 1994; Büker et al., 1992; Vogt and Somma, 2000; Jürgens, 2000). Die Möglichkeit, aus solchen Momentaufnahmen oder der Retrospektive Entscheidungshilfen für den Pflanzenbau zu beziehen sollte nicht unterschätzt werden. Hier liegt auch noch vieles brach; man schätzt z. B., dass nur 5 % aller Satellitenbilder überhaupt einmal nur angeschaut wurden (Taylor, 2002). Das eigentliche Potential der FE im PP liegt aber in der fortlaufenden Beobachtung. Einige Beispiele sollen eine Vorstellung vermitteln, was die FE leisten kann.

Mit Satelliten lässt sich bereits heute gut erkennen, ob die landwirtschaftliche Bodennutzung bestimmter Regionen mehr oder weniger umweltverträglich ist; allein aus der Anzahl und der Art der verwendeten Fruchtarten können daraus Information bezogen werden (Kühbauch, 1999) (s. Abb. 3.1-2, s. Anhang).

Hier ist die ökologische Dimension des PP einmal großräumig abgebildet. Das im Hydro-N-Sensor verwendete Messprinzip der sog. Rotverschiebung der spektralen Reflexion an der Rot/NIR-Flanke wurde früh schon in der FE angewandt (Guiyot und Barret, 1988); es handelt sich um ein sehr empfindliches Kriterium für Pflanzenvitalität. In einer Flugezmission Ende der 80-er Jahre haben wir zusammen mit Kollegen in den Niederlanden und in Großbritannien die Rotverschiebung an Grünlandparzellen gemessen, die unterschiedlich mit Stickstoff gedüngt waren (Büker et al., 1992). Es ergab sich eine sehr enge Beziehung zwischen Rotverschiebung und Stickstoffdüngung, gemessen an der Position des Hauptwendepunktes der Rot/NIR-Flanke (Abb. 3.1-3, s. Anhang).

Die Abbildung 3.1-4 (s. Anhang) zeigt die räumliche Variation der Biomasse von sehr großen Wintergerstenschlägen in Mecklenburg-Vorpommern während des Schossens am 19.4.1999 (Hawlitshka et al., 2001). Aus früheren Untersuchungen mit mehrpolaren Radarsystemen (Steingieser und Kühbauch, 1998) wussten wir, dass über Quotientbildung der Rückstreuung von Radarwellen unterschiedlicher Polarisation sich sehr enge Korrelationen mit der Pflanzenbiomasse ergeben. Die Untersuchungen waren Teil des ProSmart Projektes von DORNIER (1999). Die Biomassen in der Abbildung wurden aus den Radarsignalen L(vv)/X(hh) ermittelt.

Auch in dieser Anwendung war ein Flugzeug unterwegs. PP benötigt aber die andauernde Beobachtung. Nur so lassen sich die Zeitfenster treffen, die für die vielfältigen pflanzenbaulichen Maßnahmen in Frage kommen.

Die technischen Anforderungen des PP sind hoch, vor allem bezüglich der räumlichen und zeitlichen Auflösung bei der Zustandserfassung an Pflanzenbeständen. Weiterer Bedarf ist absehbar für höhere spektrale und radiometrische Auflösung, vor allem dann, wenn Informationen über die triviale Frage „wie grün ist ein Pflanzenbestand“ hinaus benötigt werden. Die jüngsten Entwicklungen der Satellitensysteme kommen diesen Anforderungen selbst mit den optischen Sensoren weit entgegen (Tab. 3.1-2).

Tab. 3.1-2: Technische Daten von optischen Satellitensystemen 1972 bis 2005 – unvollständig

Sensorensysteme und Jahr der Erstflüge (Betreiber)	Flughöhe (km)	Spektrale Auflösung (μm)	Geometrische Auflösung (m)	Radiometrische Auflösung (bit)	Zeitl. Auflösung (Tage)	Sichtfeld ($\text{km} \cdot \text{km}$)
Landsat 1 und 2, MSS-Sensor 1972 und 1975 (NASA)	907	0,5 – 0,6 0,6 – 0,7 0,7 – 0,8 0,8 – 1,1	57 x 79	6	18	98
Landsat 7, ETM-Sensor 1999 (NOAA)	705	0,45 – 0,515 0,525 – 0,605 0,63 – 0,69 0,75 – 0,9 1,55 – 1,75 2,09 – 2,35 10,4 – 12,5 (TIR) Pan	30 60 15	8	16	185
IKONOS 2, 1999 (Space Imaging)	681	0,45 – 0,52 0,52 – 0,6 0,63 – 0,69 0,76 – 0,9 Pan	4 1	11	< 3	11 - 14

Sensorensysteme und Jahr der Erstflüge (Betreiber)	Flughöhe (km)	Spektrale Auflösung (μm)	Geometrische Auflösung (m)	Radiometrische Auflösung (bit)	Zeitl. Auflösung (Tage)	Sichtfeld (km^2)
Aster (TERRA) Start Dez. 99 (NASA/EOS)	705	14 Bänder: 3 Bänder VNIR 0,52-0,60 0,63-0,69 0,76-0,86 6 Bänder SWIR 1,60-1,70 2,145-2,185 ... 5 Bänder TIR ...	15 30 90	8 8 11	1 - 2	
MODIS (TERRA) Start Dez. 99 (NASA/EOS)	705	36 Bänder im Bereich 0,405-14,385 0,62-0,67 0,841-0,876 0,459-0,479 0,545-565 1,230-1,250 1,628-1,652 2,105-2,155 12 Bänder im Bereich 0,405-0,965 3,660-3,840	250 500 1000 1000	12	1 - 2	2330
NEMO (Naval Map Observer) 2001 (USA)	605	Hyperspektr.: ca. 200 Kanäle 0,4 - 2,5	30 - 60	11	2,5	200 x 50
Quickbird 2, Start Okt. 01 (Digital Globe US), Daten verfügbar ab Anfang Februar 02	450	Pan: 0,45 - 0,9 Multispektr.: 0,45 - 0,52 0,52 - 0,6 0,63 - 0,69 0,76 - 0,89	Pan: 61 cm Multi- spektr.: 2,5m. Im Handel mit 70 cm und 3 m	11	3,5	16,5
RapidEye 2004/2005 (RapidEye)	610	0,44 - 0,52 0,52 - 0,6 0,63 - 0,69 0,69 - 0,73 0,76 - 0,9	6,5	10	1	159 x 1500

Die hohen Wiederholraten und nahezu komplette Abdeckung, wie sie von RapidEye geplant sind, könnten dieser Technik im PP zum Durchbruch verhelfen. IKONOS 2 und QUICKBIRD 2 sind bereits im Einsatz. Die Kosten für einen großräumigen operationellen Einsatz dieser Satelliten im PP sind aber viel zu hoch und das Aufnahme Fenster zu klein. Bei IKONOS 2 ergaben sich in der SABRES-Studie auch noch Defizite in der Zuverlässigkeit der Datenakquisition. Was die technische Kapazität der Sensoren und die Kosten für Satellitenbilder betrifft, müssen für den dauerhaften Einsatz im PP sicher noch Kompromisse gefunden

werden; höhere Präzision der Auflösungen (zeitlich, räumlich etc.) sind auch mit höheren Kosten verbunden.

Nach meiner Einschätzung ist aber eine räumliche Auflösung unter 5 bis 6 m in den meisten Anwendungsfällen nicht erforderlich. Die hyperspektrale Auflösung geht bei Satellitensensoren zu Lasten der räumlichen Auflösung (Signal/Rausch-Verhältnis) und könnte vorerst den Flugzeugsensoren vorbehalten bleiben. Für prioritär halte ich im Hinblick auf Anwendungen optischer Sensoren im PP die zeitliche Auflösung; nur damit ist es möglich, der Wetterabhängigkeit wenigstens weitgehend, wenn schon nicht gänzlich zu entkommen. Radarsensoren, wie der geplante TERRA-SAR könnten als komplementäre Systeme Wetterunabhängigkeit gewährleisten und Zusatzinformationen über die Veränderung der Pflanzenbiomasse in den Feldschlägen liefern.

Wichtig für eine erfolgreiche Einführung der Fernerkundung in den Präzisionspflanzenbau wird sein, dass die Landwirte mit möglichst fertigen Produkten beliefert werden und bei der Übersetzung von Fernerkundungsdaten in feldbezogene Anwendungen die Betreiber von Satellitensystemen und Fachberater in der Landwirtschaft zusammenwirken. Nicht nur bei uns, auch in anderen Ländern fehlt für die Belieferung der Landwirte weitgehend noch die Infrastruktur (Jürschik, 2001), das Potential der FE im PP wird aber bei den Experten weitgehend übereinstimmend als sehr hoch eingeschätzt.

3.1.5 Literatur

- Auernhammer, H. und Demmel, M., 1998: Teilflächenbewirtschaftung mit GPS – Technischer Stand und neuere Entwicklungen. - TU-München-Weihenstephan, Landtechnik-Schrift 9, 73-89.
- Blakeman, R.H., 2002: The use of near real time satellite imagery as an aid to crop management. - Proc. Applications of Remote Sensing in Agriculture, SCI Agriculture and Environment Group, London.
- Brown, R.B., Steckler, J-P.G.A. and Anderson, G.W., 1994: Remote sensing for identification of weed in no-till corn. - Transaction of the ASAE, Vol 32, 297-302.
- Büker, C., Clewers, I.G.P.W. und Kühbauch, W., 1992: Die Position des Rot-Infrarot-Anstiegs in Reflexionsspektren von Grünland – ein Maß für die Höhe der Stickstoffversorgung. – Fernerkundung in der Land- und Forstwirtschaft, 45-54.
- Dornier, 1999: Pro Smart Endbericht - Daimler Chrysler Aerospace Selbstverlag.
- Gitelsen, A.A., 2001: Non-destructive and remote sensing techniques for estimation of vegetation status. - Int. Workshop on Spectroscopy Application in Precision Farming“, IKB-Dürnast, TU-München-Weihenstephan.
- Guyot, G., Baret, F. and Major, D.J., 1988: High spectral resolution: Determination of spectral shifts between the red and near infrared. – Int. Arch. Of Photogramm. And Remote Sensing 27 (11), VII 750-760.
- Hawlitshka, S., Hammacher, M. und Kühbauch, W., 2001: Erfassung der Schlaginternen Verteilung der frischen Biomasse von Wintergerste mittels Radarfernerkundung – Photometrie, Fernerkundung, Geoinformationen 5, 345-352.
- Heege, H.J. und Reusch, S., 1996: Sensor for on the go control of site specific nitrogen top dressing. – Proc. ASAE-Meeting, Paper No. 961018.
- Jürgens, C., 2000: Fernerkundungsanwendung im Precision Farming. – Petermanns Geograph. Mitt., Bd. 144, 60-69.
- Kühbauch, W., 1999: Erfassung der Intensität landwirtschaftlicher Bodennutzung mit Hilfe der Fernerkundung. – Bayer. Akademie d. Wissensch., Rundgespräche, Kommission Ökologie, 17, Fernerkundung und Ökosystem-Analyse 87-96.
- Sökefeld, M., Gerhards, R. und Kühbauch, W., 2000: Teilschlagspezifische Unkrautkontrolle – von der Unkrauterfassung bis zur Herbizidapplikation. – Z. Pfl. Krankh. Pfl. Schutz, Sonderheft XVII, 227-233.



- Steingiesser, R. und Kühbauch, W., 1998: Erfassung der frischen und trockenen Biomasse und Schätzung der frischen Biomasse von Wintergerste in verschiedenen Regionen Europas mit einem raumgleitergetragenen Radarsensor. – J. Agron. & Crop Sci. Bd. 181, 145-152.
- Taylor, J.C., 2002: Application of remote sensing in agriculture: a down-to-earth view. - Proc. Applications of Remote Sensing in Agriculture, SCI Agriculture and Environment Group, London.
- Ulaby, F.T., Moore, R.K. and Fung, A.K., 1982: Microwave Remote Sensing Vol. III: From theory to Applications – Book-Mart-Press, Inc., North Bergen, NJ, USA, 89-96.
- Vogt, V. and Somma, F., 2000: Drought and Drought Mitigation in Europe. - Kluwer Academic Publishers, pp 325, Dordrecht-Boston-London.

