



Hochschule Neubrandenburg  
University of Applied Sciences

# **Anforderungen an die Fernerkundung aus der Sicht von Nutzern in der Land- und Forstwirtschaft**

**Diplomarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades

Dipl.-Ing. (FH) Geoinformatik

der Hochschule Neubrandenburg - University of Applied Sciences

vorgelegt von

Pauline Römisch

Neubrandenburg, den 02.03.2009

Betreuer

Prof. Dr.-Ing. Andreas Wehrenpfennig, Hochschule Neubrandenburg

Dr. rer. nat. Erik Borg, DLR Neustrelitz

**Erklärung**

Ich versichere an Eides statt, dass ich die beiliegende Diplomarbeit selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet habe.

Ferner gestatte ich der Hochschule Neubrandenburg – University of Applied Sciences, die beiliegende Diplomarbeit unter Beachtung urheber-, datenschutz- und wettbewerbsrechtlicher Vorschriften für Lehre und Forschung zu nutzen.

.....

Datum/Unterschrift

**Kurzfassung**

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Anforderungen an Fernerkundungssysteme in der Land- und Forstwirtschaft. Anhand gegenwärtig verfügbarer Literatur soll ein Überblick über derzeit bereitgestellte Fernerkundungssysteme gegeben werden und die Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung der Fernerkundung für land- und forstwirtschaftliche Zwecke aufgezeigt werden.

Schlagwörter: Fernerkundung, Landwirtschaft, Precision Farming, Precision Livestock Farming, Forstwirtschaft

**Abstract**

The present paper deals with the requirements of remote sensing systems in agriculture and forestry. By means of present literature a survey of presently available remote sensing systems should be given and the possibilities and limits in using remote sensing for agricultural and forest purposes should be shown.

Keywords: remote sensing, agriculture, precision farming, precision livestock farming, forestry

# Inhaltsverzeichnis

<b>Eidesstattliche Erklärung</b> .....	<b>i</b>
<b>Kurzfassung</b> .....	<b>ii</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>ii</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>iii</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>vii</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>viii</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>x</b>
<b>1. Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>2. Fernerkundung</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1 Definition und Geschichte</b> .....	<b>2</b>
<b>2.2 Grundlagen der Fernerkundung</b> .....	<b>6</b>
2.2.1 Elektromagnetische Strahlung.....	6
2.2.2 Reflexionseigenschaften von Böden.....	6
2.2.3 Reflexionseigenschaften von Pflanzen.....	9
2.2.3.1 <i>Vegetationsindizes</i> .....	12
2.2.3.1.1 <i>Ratio Vegetationsindizes</i> .....	13
2.2.3.1.2 <i>Orthogonal Vegetationsindizes</i> .....	16
2.2.3.1.3 <i>Hybrid Vegetationsindizes</i> .....	17
2.2.3.1.4 <i>Neue Vegetationsindizes</i> .....	18
2.2.3.1.5 <i>Differenz Vegetationsindizes</i> .....	19

<b>2.3 Aufnahmesysteme..</b> .....	<b>19</b>
2.3.1 Aktive Aufnahmesysteme.....	20
2.3.2 Passive Aufnahmesysteme.....	20
<b>2.4 Auflösung</b> .....	<b>20</b>
2.4.1 Räumliche Auflösung.....	20
2.4.2 Spektrale Auflösung.....	21
2.4.3 Radiometrische Auflösung.....	22
2.4.4 Zeitliche Auflösung.....	22
<b>2.5 Plattformen und Sensoren</b> .....	<b>22</b>
2.5.1 Flugzeuggestützte Plattformen und Sensoren.....	22
2.5.2 Satellitengestützte Plattformen und Sensoren.....	25
<b>2.6 Möglichkeiten der Datenbeschaffung</b> .....	<b>31</b>
<b>2.7 Ground Truth-Daten und Geoinformationssysteme</b> .....	<b>33</b>
<b>3. Landwirtschaft</b> .....	<b>34</b>
<b>3.1 Pflanzenbau</b> .....	<b>34</b>
3.1.1 Fernerkundung zur Untersuchung der Feldheterogenität .....	34
3.1.2 Fernerkundung in der Pflanzenproduktion.....	36
3.1.3 Precision Farming.....	41
3.1.3.1 Grundlagen, Ziele und Voraussetzungen.....	41
3.1.3.2 GPS - Definition, Funktionsweise und Anforderungen.....	45
3.1.3.3 Fernerkundung innerhalb von Precision Farming.....	50

<b>3.2 Tierhaltung</b> .....	<b>56</b>
3.2.1 Viehwirtschaft.....	56
3.2.1.1 <i>Precision Livestock Farming</i> .....	57
3.2.1.2 <i>Fernerkundung in der Tierhaltung</i> .....	61
3.2.2 Grünlandbewirtschaftung.....	63
3.2.2.1 <i>Fernerkundung in der Grünlandbewirtschaftung</i> .....	64
<b>3.3 Vorgelagerter Sektor</b> .....	<b>65</b>
3.3.1 Futtermittelindustrie.....	65
3.3.2 Landmaschinenindustrie.....	66
3.3.3 Düngemittel.....	67
3.3.4 Pflanzenschutzmittel.....	69
3.3.5 Arzneimittel.....	71
3.3.6 Saatgutwirtschaft.....	72
<b>3.4 Nachgelagerter Sektor</b> .....	<b>73</b>
<b>3.5 Administration</b> .....	<b>74</b>
3.5.1 Verbraucherschutz - Qualitätssicherung durch Rückverfolgung.....	74
3.5.2 Landwirtschaftsverwaltung - Förderungen durch InVeKoS.....	78
3.5.3 Umweltministerium.....	79
3.5.3.1 <i>Fernerkundung zur Untersuchung von Bodenerosion</i> .....	80
3.5.3.2 <i>Fernerkundung zur Untersuchung von Umweltschäden</i> <i>durch Tierhaltung</i> .....	81
3.5.3.3 <i>Umweltschadensbeobachtungen mit Hilfe der Fernerkundung</i> .....	82

---

<b>4. Forstwirtschaft.....</b>	<b>84</b>
4.1 Waldklassifikation durch Fernerkundung.....	84
4.2 Anwendung der Fernerkundung zur Erfassung von Waldschäden.....	85
4.3 Anwendung der Fernerkundung zur Kartierung von Sturmschäden.....	91
4.4 Erfassung von Waldbränden mit Hilfe der Fernerkundung.....	92
<b>5. Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>94</b>
<b>6. Literatur.....</b>	<b>97</b>

# Abbildungsverzeichnis

<b>Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum - Intensität von Reflexion und Strahlung verschiedener Medien.....</b>	<b>6</b>
<b>Abbildung 2: Strahlengang durch ein Pflanzenblatt.....</b>	<b>10</b>
<b>Abbildung 3: Reflexion im nahen Infrarot.....</b>	<b>11</b>
<b>Abbildung 4: NDVI im Sommer und im Herbst.....</b>	<b>14</b>
<b>Abbildung 5: Räumliche Auflösung verschiedener Sensoren.....</b>	<b>21</b>
<b>Abbildung 6: Konstellation der 24 GPS-Satelliten.....</b>	<b>45</b>
<b>Abbildung 7: Zusammenspiel von GPS, DGPS und dem landwirtschaftlichen Fahrzeug.....</b>	<b>50</b>
<b>Abbildung 8: Vierkanalleseeinheit.....</b>	<b>61</b>
<b>Abbildung 9: Thermographischer Sensor zur Erfassung von Schweinen.....</b>	<b>62</b>
<b>Abbildung 10: Infrastruktur des Tiertransporters .....</b>	<b>76</b>
<b>Abbildung 11: Schädigungen von Fichte, Kiefer, Buche und Eiche.....</b>	<b>87</b>
<b>Abbildung 12: Reflexionsverhalten gesunder und geschädigter Bäume.....</b>	<b>88</b>
<b>Abbildung 13: Schadstufendarstellung für die Buche im Farbinfrarotluftbild und aus terrestrischer Sicht.....</b>	<b>91</b>



## Tabellenverzeichnis

<b>Tabelle 1: Pionierphase.....</b>	<b>3</b>
<b>Tabelle 2: Frühe Entwicklung.....</b>	<b>4</b>
<b>Tabelle 3: Weltraumfernerkundung und erste Digitalisierung.....</b>	<b>5</b>
<b>Tabelle 4: Moderne Fernerkundungssysteme.....</b>	<b>5</b>
<b>Tabelle 5: Flugzeuggestützte Sensoren Teil 1.....</b>	<b>23</b>
<b>Tabelle 6: Flugzeuggestützte Sensoren Teil 2.....</b>	<b>24</b>
<b>Tabelle 7: Flugzeuggestützte Sensoren Teil 3.....</b>	<b>24</b>
<b>Tabelle 8: Satellitengestützte Sensoren Teil 1.....</b>	<b>27</b>
<b>Tabelle 9: Satellitengestützte Sensoren Teil 2.....</b>	<b>28</b>
<b>Tabelle 10: Satellitengestützte Sensoren Teil 3.....</b>	<b>29</b>
<b>Tabelle 11: Satellitengestützte Sensoren Teil 4.....</b>	<b>30</b>
<b>Tabelle 12: Übersicht über Bezugsadressen von Satellitendaten im Internet.....</b>	<b>32</b>
<b>Tabelle 13: Parameter für den Zustand des Pflanzenbestands.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabelle 14: Parameter für den Zustand des Bodens.....</b>	<b>40</b>
<b>Tabelle 15: Stickstoffsensoren.....</b>	<b>43</b>
<b>Tabelle 16: Anforderungskriterien an digitale Echtfarbenluftbilder.....</b>	<b>51</b>
<b>Tabelle 17: Anforderungskriterien an digitale Infrarotaufnahmen.....</b>	<b>52</b>
<b>Tabelle 18: Anforderungskriterien an Multispektralaufnahmen.....</b>	<b>53</b>
<b>Tabelle 19: Sensoren im Precision Livestock Farming.....</b>	<b>58</b>

<b>Tabelle 20: Untersuchungsparameter und Anforderungskriterien für Düngemitteltests mit Fernerkundung.....</b>	<b>69</b>
<b>Tabelle 21: Untersuchungsparameter und Anforderungskriterien für Pflanzenschutzmitteltests mit Fernerkundung.....</b>	<b>69</b>
<b>Tabelle 22: Schadstufeneinteilung nach mittlerem Nadel- oder Blattverlust und Vergilbung.....</b>	<b>90</b>

## Abkürzungsverzeichnis

<b>Abb.</b>	<b>Abbildung</b>
<b>ADAR</b>	<b>Airborne Data Acquisition and Registration</b>
<b>ADC</b>	<b>Agricultural Development Consulting</b>
<b>AISA</b>	<b>Airborne Imaging Spectroradiometer for Applications</b>
<b>AMDC</b>	<b>Airborne Multispectral Digital Camera</b>
<b>AMS</b>	<b>Airborne Multispectral Scanner</b>
<b>AOL</b>	<b>Airborne Oceanographic LIDAR</b>
<b>ATM</b>	<b>Airborne Topographic Mapper</b>
<b>AVHRR</b>	<b>Advanced Very High Resolution Radiometer</b>
<b>AVIRIS</b>	<b>Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer</b>
<b>BI</b>	<b>Brightness Index</b>
<b>Bit</b>	<b>Binary digit</b>
<b>BSE</b>	<b>Bovine spongiforme Enzephalopathie</b>
<b>BUS</b>	<b>Binary Unit System</b>
<b>BVL</b>	<b>Bundesministerium für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit</b>
<b>c</b>	<b>celeritas (= Lichtgeschwindigkeit)</b>
<b>CASI</b>	<b>Compact Airborne Spectrographic Imager</b>
<b>CIR</b>	<b>Color Infra-red (Farbinfrarot)</b>
<b>cm</b>	<b>Zentimeter</b>
<b>CO<sub>2</sub></b>	<b>Kohlendioxid</b>
<b>CORINE</b>	<b>Coordination of Information on the Environment</b>
<b>DIN</b>	<b>Deutsche Industrie-Norm</b>
<b>DNA</b>	<b>Desoxyribonucleic acid</b>
<b>DGPS</b>	<b>differentielles Global Positioning System</b>
<b>DJO</b>	<b>Daimler Chrysler Aerospace Jena-Optronik</b>
<b>DLR</b>	<b>Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt</b>
<b>EG</b>	<b>Europäische Gemeinschaft</b>
<b>ENVISAT</b>	<b>Environmental Satellite</b>
<b>EPS</b>	<b>Echtzeit Positionierungsservice</b>
<b>EROS</b>	<b>Extremely Reliable Operating System</b>
<b>ERS</b>	<b>European Remote Sensing Satellite</b>

---

<b>ERTS</b>	<b>Earth Resources Technology Satellite</b>
<b>ESA</b>	<b>European Space Agency</b>
<b>ETM+</b>	<b>Enhanced Thematic Mapper Plus</b>
<b>EU</b>	<b>Europäische Union</b>
<b>EWG</b>	<b>Europäische Wirtschaftsgemeinschaft</b>
<b>GAF</b>	<b>Gesellschaft für Angewandte Fernerkundung</b>
<b>GHPS</b>	<b>Geodätischer Hochpräziser Positionierungsservice</b>
<b>GIS</b>	<b>Geoinformationssystem</b>
<b>GMS</b>	<b>Geostationary Meteorological Satellite</b>
<b>GOES</b>	<b>Geostationary Operational Environmental Satellite</b>
<b>GOME</b>	<b>Global Ozone Monitoring Experiment</b>
<b>GPS</b>	<b>Global Positioning System</b>
<b>GPSS</b>	<b>Geodätischer Präziser Positionierungsservice</b>
<b>GPRS</b>	<b>General Packet Radio Service</b>
<b>GVI</b>	<b>Green Vegetation Index</b>
<b>ha</b>	<b>Hektar</b>
<b>HEPS</b>	<b>Hochpräziser Echtzeit Positionierungsservice</b>
<b>HRVIR</b>	<b>High Resolution Visible and Infrared</b>
<b>HVR</b>	<b>High Resolution Visible</b>
<b>INFEO</b>	<b>Information on Earth Observation</b>
<b>INSAT</b>	<b>Indian National Satellite System</b>
<b>InVeKoS</b>	<b>integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem</b>
<b>IRS</b>	<b>Indian Remote Sensing Satellite</b>
<b>ISO</b>	<b>Internationale Organisation für Normung</b>
<b>JERS</b>	<b>Japanese Earth Resources Satellite</b>
<b>JPL</b>	<b>Jet Propulsion Lab</b>
<b>km</b>	<b>Kilometer</b>
<b>LAI</b>	<b>Leaf-Area-Index (Blattflächenindex)</b>
<b>Laser</b>	<b>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</b>
<b>Landsat</b>	<b>Land Remote-Sensing Satellite</b>
<b>LASSIE</b>	<b>Low Altitude Stationary Surveillance Instrumental Equipment</b>
<b>LED</b>	<b>Light Emitting Diode</b>

---

<b>LfL</b>	<b>Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik</b>
<b>LISS</b>	<b>Linear Imaging Self Scanning Sensor</b>
<b>LogR</b>	<b>Log Ratio</b>
<b>m</b>	<b>Meter</b>
<b>METEOSAT</b>	<b>Meteorological Satellite</b>
<b>MetOp</b>	<b>Meteorological Operational satellite</b>
<b>MIR</b>	<b>Mittleres Infrarot</b>
<b>mm</b>	<b>Millimeter</b>
<b>MNDVI</b>	<b>Modified Normalized Vegetation Index</b>
<b>MODIS</b>	<b>Moderate Resolution Imaging Spectoradiometer</b>
<b>MOMS</b>	<b>Modulares opto-elektronisches multispektrales Satellitenbilddaufnahmesystem</b>
<b>MOS</b>	<b>Multispectral Opto-electronic Scanner</b>
<b>MSAVI</b>	<b>Modified Soil Adjusted Vegetation Index</b>
<b>MSI</b>	<b>Moisture Stress Index</b>
<b>MSS</b>	<b>Multispectral Scanner</b>
<b>N</b>	<b>Stickstoff</b>
<b>NASA</b>	<b>National Aeronautics and Space Administration</b>
<b>NDVI</b>	<b>Normalized Vegetation Index</b>
<b>NIR</b>	<b>Nahes Infrarot</b>
<b>NOAA</b>	<b>National Oceanic and Atmospheric Administration</b>
<b>nsec</b>	<b>Nanosekunde</b>
<b>O<sub>3</sub></b>	<b>Ozon</b>
<b>PAN</b>	<b>Panchromatic</b>
<b>PC</b>	<b>Personal Computer</b>
<b>PDA</b>	<b>Personal Digital Assistant</b>
<b>Pixel</b>	<b>Picture element</b>
<b>PVI</b>	<b>Perpendicular Vegetation Index</b>
<b>Radar</b>	<b>Radio Detection and Ranging</b>
<b>Radarsat</b>	<b>Radio Detection And Ranging Satellite</b>
<b>RFID</b>	<b>Radio Frequency Identification</b>
<b>RTK</b>	<b>Real-Time Kinematic</b>

---

<b>RVI</b>	<b>Ratio Vegetation Index</b>
<b>SAPOS</b>	<b>Satellitenpositionierungsdienst</b>
<b>SAR</b>	<b>Synthetic Aperture Radar</b>
<b>SAVI</b>	<b>Soil Adjusted Vegetation Index</b>
<b>SBI</b>	<b>Spatial Business Integration</b>
<b>SCIAMACHY</b>	<b>Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography</b>
<b>SPOT</b>	<b>Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography</b>
<b>SQR</b>	<b>Square Ration</b>
<b>SRU</b>	<b>Sachverständigenrat für Umweltfragen</b>
<b>SSC</b>	<b>Site Similarity Certification</b>
<b>STREMODO</b>	<b>Stressschrei-Monitor- und Dokumentationseinheit</b>
<b>TIR</b>	<b>Thermales Infrarot</b>
<b>TLL</b>	<b>Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft</b>
<b>TM</b>	<b>Thematic Mapper</b>
<b>TQC</b>	<b>Total Quality Control</b>
<b>TRMM</b>	<b>Tropical Rainfall Measurement Mission</b>
<b>TSAVI</b>	<b>Transformed Soil Adjusted Vegetation Index</b>
<b>UMTS</b>	<b>Universal Mobile Telecommunications System</b>
<b>USA</b>	<b>United States of America</b>
<b>USGS</b>	<b>United States Geological Survey</b>
<b>VI</b>	<b>Vegetationsindex</b>
<b>VIS</b>	<b>Visible</b>
<b>WI</b>	<b>Wetness Index</b>
<b>WLAN</b>	<b>Wireless Local Area Network</b>
<b>XML</b>	<b>eXtensible Markup Language</b>
<b>€</b>	<b>Euro</b>
<b><math>\lambda</math></b>	<b>Lamda (=Wellenlänge)</b>
<b><math>\mu\text{m}</math></b>	<b>Mikrometer</b>
<b><math>\nu</math></b>	<b>Ny (=Frequenz)</b>

## **1. Einleitung**

Die Erfassung von Vegetation spielte schon seit dem Beginn der Fernerkundung eine bedeutende Rolle. So wurden zum Beispiel bereits 1887 Versuche zum Einsatz von Luftbildern aus einem Ballon in der Forstwirtschaft durchgeführt [HILDEBRANDT 1996]. Seit über 30 Jahren existieren verschiedene, teils hochauflösende, flugzeug- und satellitengestützte Aufnahmesysteme, mit denen verschiedene Anwendungen in der Land- und Forstwirtschaft realisiert werden können.

Die Landwirtschaft ist heute hoch entwickelt und dient neben der Nahrungsmittelerzeugung auch der Erhaltung und Pflege von Kulturlandschaften und der Sicherung natürlicher Lebensgrundlagen. Die Fernerkundung kann hierfür die notwendige Datengrundlage für eine ressourcen- und umweltschonende Entwicklung liefern [BORG & KLISCH 2006]. Mit Hilfe der Fernerkundung können mit relativ geringem Aufwand Informationen über Veränderungen des Bodens und in Pflanzenbeständen gewonnen werden und dadurch der Betriebsmitteleinsatz und andere wichtige landwirtschaftliche Maßnahmen abgeleitet und effektiv durchgeführt werden.

Die Forstwirtschaft benötigt meistens detaillierte Informationen über große Areale [COENRADIE 2003]. Der Überblick über die Gesamtsituation ist daher von oben am besten gegeben. In der Forstwirtschaft findet die Fernerkundung deshalb wichtige Anwendungsbereiche in der Erhebung von Bestandsdaten, der Erfassung von Waldschäden und im Waldbrandmonitoring [ALBERTZ 2007].

## **2. Fernerkundung**

### **2.1 Definition und Geschichte**

Unter Fernerkundung versteht man ein berührungsfreies Beobachtungsverfahren, wobei der Sensor keinen direkten Kontakt mit dem zu erkundenden Objekt hat. Die Messung wird somit nicht direkt am Objekt, sondern an dessen Abbildung durchgeführt. Die zu messende Größe ergibt sich aus der elektromagnetischen Strahlung, welche vom Messobjekt reflektiert oder emittiert wird [ALBERTZ 2007].

Nach DIN 18716/3 wird die Fernerkundung definiert als „die Gesamtheit der Verfahren zur Gewinnung von Informationen über die Erdoberfläche durch Messung und Interpretation der von ihr ausgehenden (Energie-)Felder. Als Informationsträger dient dabei die von der Erde reflektierte oder emittierte elektromagnetische Strahlung“. Die Fernerkundung umfasst somit alle analogen als auch digitalen Erfassungs- und Verarbeitungsverfahren. Hierzu zählen Aufnahme und Speicherung der Daten sowie die manuelle oder automatische Datenverarbeitung, Bildanalyse und Präsentation [HOWARD 1991].

Die Einrichtungen für den Empfang der elektromagnetischen Strahlung befinden sich in Luft- und Raumfahrzeugen [ALBERTZ 2007]. Somit können mit Hilfe der Fernerkundung Objekte oder Ereignisse auch über weite Entfernungen hinweg beobachtet werden. Hierzu gehören neben den sich auf der Erdoberfläche befindlichen Objekten auch Erscheinungen auf der Meeresoberfläche, in der Atmosphäre oder auf anderen Himmelskörpern [BALDENHOFER & MARSCHALL 2009].

Das Interesse an der Beobachtung der Erdoberfläche durch Ballonfahrer begann bereits vor der Erfindung der Photographie [ALBERTZ 2007]. Die Erfindung der Photographie im Jahre 1839 und die Entwicklung der ersten photographischen Kamera im Jahre 1850 ermöglichte Gaspar F. Tournachon, alias Nadar, im Jahre 1858 erste photographische Bilder aus einem Fesselballon in 80 m Höhe über Paris [KONECNY 2003], [ALBERTZ 2007], [BALDENHOFER & MARSCHALL 2009]. Diese Ballonaufnahmen stellten somit den Beginn der modernen Fernerkundung dar [BALDENHOFER & MARSCHALL 2009].



PAPPENHEIMER [2007] unterteilt die geschichtliche Entwicklung der Fernerkundung in vier Phasen:

- 1860er – 1910er Jahre: Pionierphase
- 1920er – 1950er Jahre: Frühe Entwicklung
- 1960er – 1970er Jahre: Weltraumfernerkundung und erste Digitalisierung
- ab 1980er Jahre: Moderne Fernerkundungssysteme

In den Tabellen 1 bis 4 ist die historische Entwicklung der Fernerkundung von 1860 bis heute zusammengefasst.

Tabelle 1: Pionierphase [Quelle: KONECNY 2003, HILDEBRANDT 1996, ALBERTZ 2007, THEILEN-WILLIGE 1993, BALDENHOFER & MARSCHALL 2009, PAPPENHEIMER 2007]

<b>Pionierphase</b>	
1860er	Luftbildaufnahmen mit Hilfe von Drachen, Ballons, Raketen und Brieftauben; ballongestützte Luftaufklärung im amerikanischen Bürgerkrieg
1887	Kartierung von Baumarten mit Hilfe von Luftaufnahmen aus Ballons durch deutsche Förster in Pommern
Ende 19. Jh.	Messung von Druck-, Temperatur- und Feuchteprofilen in der unteren Atmosphäre mit Hilfe von Ballons führt zur Entdeckung der Tropopause
1906	Albert Maul konstruiert luftdruckbetriebene Rakete, die in einer Höhe von ca. 900m Luftaufnahmen macht, die Kamera ausstößt und per Fallschirm am Boden landen lässt; G. R. Lawrence konstruiert Kameras, die an Bord von Ballondrachen in 600m Höhe Luftbilder von den Bränden und Erdbebenzerstörungen in Süd Frankreich aufnehmen
1909	erste photographische Bilder aus einem Motorflugzeug in Centocelli (Italien) durch Wilbur Wright

Tabelle 2: Frühe Entwicklung [Quelle: KONECNY 2003, HILDEBRANDT 1996, ALBERTZ 2007, THEILEN-WILLIGE 1993, BALDENHOFER & MARSCHALL 2009, PAPPENHEIMER 2007]

<b>Frühe Entwicklung</b>	
1914-1918	Systematische Reihenaufnahmen, militärische Luftaufnahmen; Entwicklung spezieller Kameras für Luftaufnahmen
1919	erstes (thermales) Infrarotbild wird aus einem Flugzeug aufgenommen
1920er	experimentelle, nutzerorientierte Anwendung von Luftbildphotographie und Photogrammetrie für forstliche, geographische und archäologische Zwecke; erste großräumige Luftbilderkundungen in Indonesien, der Antarktis und Grönland
1930er	Entwicklung des Radar durch Deutschland, das Vereinigte Königreich und die USA
1939-1945	im 2. Weltkrieg militärische Luftbildauswertung, Einsatz von Luftbildplanwerken, Farbfilm; Testeinsatz von SIR, CIR-Film zur Aufdeckung von Tarnungen, Einsatz von Flugzeugen und Raketen (V1, V2)
1950er	erstmalige Verwendung des Begriffs „remote sensing“ in den USA durch Evelyn Pruitt vom U.S. Office of Naval Research
1954	Entwicklung des ersten flugzeuggestützten Seitensicht-Radar durch Westinghouse; Erstflug des Spionageflugzeugs U-2
1957	Start des russischen Satelliten Sputnik I
1958	Start des Explorer-1 führt zur Entdeckung der strahlungsintensiven Zonen des Van-Allen-Gürtels; Gründung der NASA
1959	erstes photographisches Satellitenbild (amerikanische Explorer-6-Mission)

Tabelle 3: Weltraumfernerkundung und erste Digitalisierung [Quelle: KONECNY 2003, HILDEBRANDT 1996, ALBERTZ 2007, THEILEN-WILLIGE 1993, BALDENHOFER & MARSCHALL 2009, PAPPENHEIMER 2007]

<b>Weltraumfernerkundung und erste Digitalisierung</b>	
1960	erste Satellitenbilder für meteorologische Zwecke durch TIROS-1 (USA)
Mai 1961	Mercury-Kapsel nimmt erste Farbbilder der Erde auf
ab 1962	Fernerkundungsmissionen zu anderen Planeten
ab 1965	photographische Aufnahmen aus den Raumkapseln Gemini und Apollo (USA)
1968	erster Satellit mit passiven Mikrowellensensoren Kosmos 243 aus Russland
1972	erstes digitales Satellitenbild der Erderkundung durch Scanner an Bord des amerikanischen ERTS-1 (später Landsat-1) zur Erforschung der Möglichkeiten und Grenzen der Fernerkundung (Grundlagenforschung)
1977	erster Meteosat-Satellit im geostationären Orbit

Tabelle 4: Moderne Fernerkundungssysteme [Quelle: KONECNY 2003, HILDEBRANDT 1996, ALBERTZ 2007, THEILEN-WILLIGE 1993, BALDENHOFER & MARSCHALL 2009, PAPPENHEIMER 2007]

<b>Moderne Fernerkundungssysteme</b>	
1981	erster Space Shuttle-Flug
ab 1986	erste stereophotogrammetrisch auswertbare Bilddaten mit dem französischen Satellitensystem SPOT
ab 1990	erste Raumstationen zur operationellen Fernerkundung
1991	Start des europäischen ERS-1 als erster Satellit, dessen Altimeter die Erde mit einer Genauigkeit von 5 cm vermessen konnte
1996	Entwicklung von IRS 1C + 1D
1997	erstes Regenradar auf einem Satelliten (Tropical Rainfall Measurement Mission TRMM)
Ende 20. Jh.	erste rein kommerzielle, nicht-staatliche Fernerkundungssatelliten wie Ikonos-2 und QuickBird mit einer geometrischen Auflösung von ca. einem Meter und weniger
2002	Start des größten europäischen Umweltsatelliten Envisat
2006	Start des ersten europäischen Wettersatelliten auf polarer Umlaufbahn (MetOp)

## 2.2 Grundlagen der Fernerkundung

### 2.2.1 Elektromagnetische Strahlung

Die Bilddatenerhebung in der Fernerkundung geschieht über einen Sensor (Luftkamera, Scanner, Radar), welcher auf einem Flugzeug oder Satelliten installiert ist [JANSEN 2001]. Über den Sensor wird die elektromagnetische Strahlung, die von einem Objekt reflektiert oder emittiert wird, erfasst.

Unter der elektromagnetischen Strahlung versteht man die Ausbreitung von Energie mit einer Fortbewegungsgeschwindigkeit von ca. 300.000 km/s (= Lichtgeschwindigkeit) [ALBERTZ 2007], [HILDEBRANDT et al. 1984]. Die elektromagnetische Strahlung kann auch als Wellenstrahlung bezeichnet werden [ALBERTZ 2007]. Als Einteilungskriterium der elektromagnetischen Strahlung wird daher die Wellenlänge  $\lambda$  (Lambda) verwendet. Strahlungsquellen senden mit unterschiedlicher Intensität Wellen in verschiedenen Frequenzen aus [THEILEN-WILLIGE 1993]. Die Wellenlänge  $\lambda$  ergibt sich somit aus dem Quotienten der Lichtgeschwindigkeit  $c$  und der Frequenz  $\nu$ , das heißt  $\lambda = c / \nu$ . Die elektromagnetische Strahlung wird durch das elektromagnetische Spektrum klassifiziert, welches die Gesamtheit aller vorkommenden Wellenlängen darstellt [ALBERTZ 2007], [HILDEBRANDT et al. 1984]. In Abbildung 1 sind das elektromagnetische Spektrum und die Reflexions- und Strahlungsintensität für verschiedene Medien innerhalb dieses Spektrums dargestellt.

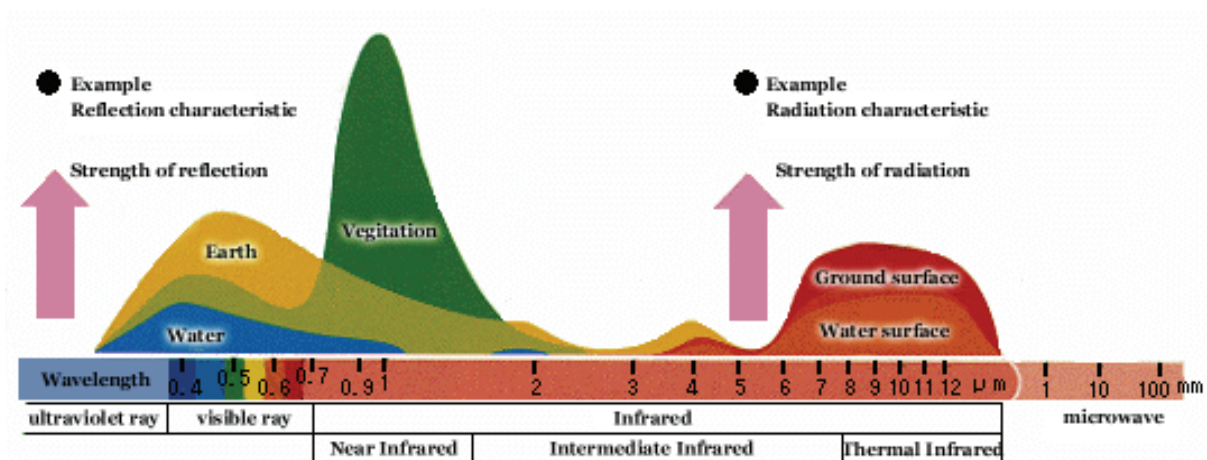


Abbildung 1: Das elektromagnetische Spektrum - Intensität von Reflexion und Strahlung verschiedener Medien. [Quelle: JAXA 2009]

In der Fernerkundung wird nicht das gesamte elektromagnetische Spektrum, sondern es werden nur Teilbereiche von diesem verwendet. So arbeiten Multi- oder Hyperspektralscanner im sichtbaren Bereich, im nahen, mittleren und thermalen Infrarot; Thermalscanner im mittleren und thermalen Infrarot und Radarsysteme im Mikrowellenbereich [NIEMEYER 2008].

Die auf der Erdoberfläche ankommende Strahlung wird durch die Beschaffenheit der Atmosphäre (Wassergehalt, CO<sub>2</sub>-Gehalt, O<sub>3</sub>-Gehalt, Aerosole) ganz oder teilweise absorbiert [STREIT 2009]. Nutzbare Frequenzbereiche für die Fernerkundung werden durch atmosphärische Fenster – Bereiche für die die Atmosphäre durchlässig ist – bestimmt [ALBERTZ 2007], [THEILEN-WILLIGE 1993], [HILDEBRANDT et al. 1984]. Die Bereiche der atmosphärischen Fenster liegen bei 0,2-0,4 µm im Bereich der ultravioletten Strahlung, bei 0,4-0,7 µm im Bereich des sichtbaren Lichtes (VIS), bei 0,3-2,5 µm im nahen Infrarot (NIR), bei 3-5 µm im mittleren Infrarot (MIR), bei 8-13 µm im thermalen Infrarot (TIR) und im vollständigen Mikrowellenbereich [ALBERTZ 2007], [STREIT 2009].

Die Hauptquelle der elektromagnetischen Strahlung ist die Sonne [THEILEN-WILLIGE 1993]. Die maximale Sonnenstrahlung liegt bei einer Wellenlänge von 0,480 µm bei einer Durchschnittstemperatur von 6.000 K [HILDEBRANDT et al. 1984]. In der Fernerkundung kann nur die Strahlung, die von der Erdoberfläche reflektiert wird (sichtbares Licht und nahes Infrarot bis 2,5 µm) und die Strahlung, die die Erdoberfläche durch ihre Eigentemperatur direkt abgibt, verwendet werden [ALBERTZ 2007]. Die Erde hat eine Durchschnittstemperatur von 300 K [HILDEBRANDT et al. 1984]. Das Maximum der Strahlung verschiebt sich mit sinkender Temperatur in höhere Wellenlängen [NIEMEYER 2008]. Dadurch liegt die maximale Erdstrahlung bei einer Wellenlänge von 9,7 µm [HILDEBRANDT et al. 1984]. Neben der Sonnenstrahlung verwendet die Fernerkundung auch künstliche Strahlungsquellen wie Schall oder Radar [BALDENHOFER & MARSCHALL 2009].

Die Reflexion einer Fläche ist abhängig von deren Material, Zustand, Oberflächenrauigkeit und von deren geometrischen Verhältnissen [ALBERTZ 2007]. Ist die Oberflächenrauigkeit im Vergleich zur Wellenlänge klein, so spricht man von einer Spiegelreflexion, wie sie zum Beispiel an Wasseroberflächen vorkommt [ALBERTZ 2007]. Hier wird alle einfallende Energie in eine Richtung von der Oberfläche weggelenkt [JI 2002]. Ist die Oberflächenrauigkeit dagegen genauso groß wie die Wellenlänge, spricht man von einer diffusen Reflexion

[ALBERTZ 2007]. Hier wird die ankommende Energie in alle Richtungen reflektiert [JI 2002]. In der Natur kommen beide Reflexionsarten immer in Kombination vor [JI 2002], [ALBERTZ 2007].

### 2.2.2 Reflexionseigenschaften von Böden

Die am Boden einfallende Sonnenstrahlung wird reflektiert oder absorbiert, der reflektierte Teil wird durch Sensoren erfasst [LILIENTHAL 2003]. Die Reflexion von Böden wird durch die Bodenfeuchtigkeit, die Art und die Größe bodenbildender Minerale (Calciumcarbonat, Eisenoxide, Tonminerale), die Art und den Anteil an Humusstoffen, und die Korngröße beeinflusst [HILDEBRANDT et al. 1984], [TLL & DJO 2000], [LILIENTHAL 2003].

#### Bodenfeuchte

Mit zunehmendem Wassergehalt sinkt das Reflexionsvermögen der Böden, wodurch feuchte Böden dunkler erscheinen als trockene [STREIT 2009], [LILIENTHAL 2003]. Sobald eine bestimmte Feuchtigkeit erreicht ist, kommt es zur Wasserabsorption bei  $\lambda = 1,45 \mu\text{m}$ ,  $1,95 \mu\text{m}$  und  $2,6 \mu\text{m}$  [TLL & DJO 2000], [HILDEBRANDT et al. 1984]. In höheren Wellenlängenbereichen ist der Kontrast zwischen feuchten und trockenen Böden deutlich sichtbar, so dass sich der Bereich des mittleren Infrarots (MIR) besonders zur Analyse des Bodenwassergehalts eignet, da das Reflexionsverhalten hier durch die Feuchte stärker beeinflusst wird als durch Humus [TLL & DJO 2000].

#### Minerale

Eisenoxide führen im sichtbaren Bereich zu einer Färbung des Bodens [LILIENTHAL 2003], [HILDEBRANDT et al. 1984]. Calciumcarbonat hat eine starke positive Korrelation im roten Bereich und im Bereich des nahen Infrarot [TLL & DJO 2000]. Im Wellenlängenbereich von  $2,08 \mu\text{m}$  und  $2,35 \mu\text{m}$  kommt es zur Absorption von Tonmineralen [TLL & DJO 2000].

#### Humus

Je mehr Humus ein Boden enthält, desto geringer ist die Gesamtreflexion [LILIENTHAL 2003]. Liegt der Humusanteil über 2 %, kommt es zu einer vollständigen Überlagerung der Reflexion anderer Bodenbestandteile [LILIENTHAL 2003]. Bei unbewachsenen Böden steigt die Reflexion zwischen  $0,4$  und  $1 \mu\text{m}$  kontinuierlich an [TLL & DJO 2000]. Die höchsten Re-

flexionswerte treten laut TLL & DJO [2000] bei unentwickelten Böden mit wenig organischer Substanz auf, die niedrigsten Reflexionswerte bei Böden mit viel organischer Substanz. Das heißt Humus hat eine negative Korrelation in allen Bereichen [TLL & DJO 2000].

### Korngröße

Mit abnehmender Korngröße kommt es zu einer Zunahme der Reflexion [TLL & DJO 2000], [LILIENTHAL 2003]. Gleichzeitig aber kommt es auch zu einer Abflachung der Reflexionskurve im sichtbaren Bereich [LILIENTHAL 2003]. Bei aggregatbildenden Böden kommt es mit zunehmender Aggregatgröße zu einer Abnahme der Gesamreflexion [LILIENTHAL 2003]. Im Wellenlängenbereich zwischen 0,4  $\mu\text{m}$  (blaues sichtbares Licht) und 3,0  $\mu\text{m}$  (mittleres IR) hat schluffig-toniger Boden eine wesentlich höhere Reflexion als sandiger Boden [STREIT 2009].

### **2.2.3 Reflexionseigenschaften von Pflanzen**

Alle Vegetation reagiert ähnlich auf Sonnenlicht. Unterschiede im Reflexionsverhalten können aber aufgrund der Morphologie und der Physiologie einer Pflanze, durch die Reflexionseigenschaften der Blattoorgane, durch die Stellung der Blattoorgane und durch die Artenzusammensetzung des Bestandes, der Bodenart und des Klimas auftreten [RUNDQUIST et al. 2002], [HILDEBRANDT et al. 1984].

Die Strahlung gelangt durch die Kutikula und die Epidermis der Pflanzenzellen zu den Chloroplasten [HOWARD 1991]. Die Chloroplasten enthalten Chlorophyll a und b, welches im sichtbaren Spektralbereich zwischen  $\lambda = 0,43 \mu\text{m}$  und  $\lambda = 0,45 \mu\text{m}$  (blau) und zwischen  $\lambda = 0,65 \mu\text{m}$  und  $\lambda = 0,66 \mu\text{m}$  (rot) zu einer starken und im Bereich zwischen  $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$  und  $\lambda = 0,6 \mu\text{m}$  (grün) zu einer geringen Absorption der Strahlung führt [JI 2002], [LILIENTHAL 2003]. Dadurch erscheinen die Blätter im Sommer grün [JI 2002], [ALBERTZ 2007], [HILDEBRANDT et al. 1984]. Im Herbst ist weniger Chlorophyll im Blatt vorhanden, was dazu führt, dass im roten Wellenlängenbereich die Absorption geringer und die Reflexion höher ist als im Sommer und somit die Blätter im Herbst rot oder gelb erscheinen [JI 2002]. Licht, das nicht absorbiert wird, wird zerstreut und von den Zellwänden des weichen und schwammigen Mesophyll vielfach reflektiert und anschließend von den Blattpigmenten teil-

weise absorbiert [RUNDQUIST et al. 2002], [ALBERTZ 2007], [HOWARD 1991]. Abbildung 2 zeigt die schematische Darstellung des Strahlengangs durch ein Pflanzenblatt.

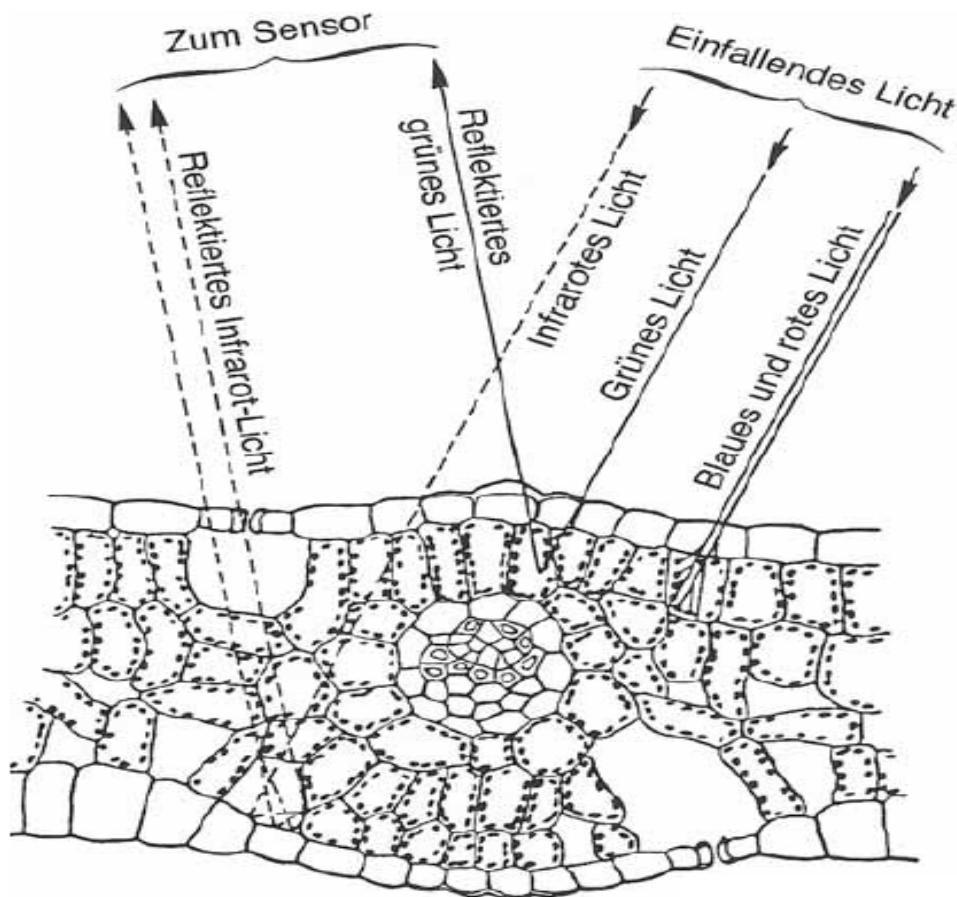


Abbildung 2: Strahlengang durch ein Pflanzenblatt [Quelle: ALBERTZ 2007]

Die Reflexion im nahen Infrarot (NIR) ist ausschlaggebend für die Gesundheit einer Pflanze [JI 2002]. Gesunde Blätter reflektieren hier laut THEILEN-WILLIGE [1993] bis zu 70 % der einfallenden Strahlung [vgl. Abb. 3]. Außerdem herrscht eine hohe Transmission und eine geringe Absorption [HILDEBRANDT et al. 1984].



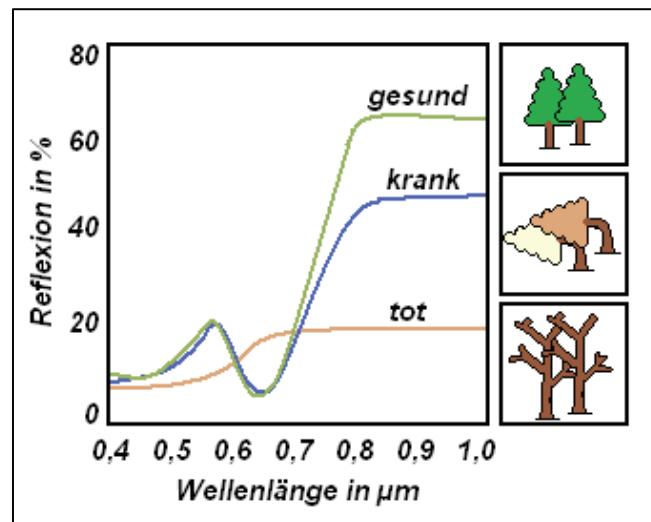


Abbildung 3: Reflexion im nahen Infrarot

[Quelle: JAXA 2009, verändert]

Zwischen  $\lambda = 1,3 \mu\text{m}$  und  $\lambda = 2,5 \mu\text{m}$  existieren drei Absorptionsbänder für Wasser bei  $\lambda = 1,4 \mu\text{m}$ ;  $1,9 \mu\text{m}$  und  $2,5 \mu\text{m}$  [JI 2002], [HILDEBRANDT et al. 1984]. Ist eine Pflanze gesund, so hat sie an diesen Stellen ein Reflexionsminimum [JI 2002], [HILDEBRANDT et al. 1984]. Bei Wasserverlust steigt die Reflexion in diesen Bereichen an [HILDEBRANDT et al. 1984].

Das Reflexionsverhalten einer Pflanze kann sich durch die Veränderung der Blattpigmentierung und aufgrund von Wachstumsprozessen verändern [ALBERTZ 2007]. Ein optimales Reflexionsverhalten bei jungen Pflanzen wird durch blaue Töne gekennzeichnet, an grünen, gelben oder roten Tönen ist eine Abnahme der Vitalität erkennbar [THEILEN-WILLIGE 1993]. Bei Veränderung der Pigmentierung während der Vegetationsperiode oder durch Schädlinge, Krankheiten oder fehlendes Chlorophyll ändert sich das Reflexionsverhalten der Pflanze [HILDEBRANDT et al. 1984]. Durch Stresssituationen wie Wassermangel oder durch Schadstoffe tritt im Bereich des sichtbaren roten Lichtes ( $0,6 \mu\text{m}$ ) eine erhöhte, im Bereich des nahen Infrarot ( $0,7$  bis  $1,0 \mu\text{m}$ ) eine verminderte Reflexion auf [THEILEN-WILLIGE 1993], [STREIT 2009]. Fehlende Nährstoffe führen zu einer Einschränkung der Photosynthese, was wiederum zu einer Zunahme der Reflexion im roten Bereich führt [LILIENHAL 2003]. Durch Stickstoffmangel wird das gesamte Spektrum beeinflusst, indem die Reflexion im sichtbaren Bereich durch Chlorophyllmangel erhöht und im NIR durch eine geringere Blattmasse gesenkt wird [LILIENHAL 2003].

### 2.2.3.1 Vegetationsindizes

Vegetationsindizes (VI) sind dimensionslose Parameter [ASNER et al. 2003], die zwischen bewachsenen, unbewachsenen oder abgestorbenen Vegetationsflächen unterscheiden können [HILDEBRANDT 1996]. Die Indizes ergeben sich aus Berechnungen und Messwerten der Spektralkanäle als Verhältnis bzw. Kombination aus den roten und nahinfraroten Spektralteilen [HILDEBRANDT 1996], [GAF 1999].

Vegetationsindizes sind Indikatoren für das Pflanzenwachstum, für biophysikalische Vegetationsparameter wie zum Beispiel den Blattflächenindex (Leaf-Area-Index, LAI) sowie für die Biomasse und die photosynthetisch absorbierte Strahlung [ASNER et al. 2003], [HUETE et al. 1994], [GAF 1999]. Es sind heute über 40 verschiedene Indizes bekannt [KELLER 2002].

Vegetationsindizes können in die folgenden fünf größeren Gruppen eingeteilt werden:

- Ratio Vegetationsindizes, welche durch einfachste Berechnungen oder Kanalkombinationen gebildet werden [BROGE & LEBLANC 2000].
- Orthogonal Vegetationsindizes, welche aus den Bodenparametern und einem Anteil der Strahlung gebildet werden [BROGE & LEBLANC 2000].
- Hybrid Vegetationsindizes als Kombination von Ratio- und Orthogonal Vegetationsindizes [BROGE & LEBLANC 2000].
- Vegetationsindizes, basierend auf zwei oder drei diskreten Bändern, bei denen die absorbierte Strahlungsenergie mit dem Betrag der Grün- Reflexion in Verbindung gesetzt wird, auch neue VI genannt [BROGE & LEBLANC 2000].
- Differenz Vegetationsindizes, welche ähnlich wie die Ratio VI durch einfachste Berechnungen oder Kanalkombinationen gebildet werden [HILDEBRANDT 1996].

### 2.2.3.1.1 Ratio Vegetationsindizes

#### Der Ratio Vegetation Index (RVI, auch Simple Ratio)

Zur Berechnung des RVI wird die Reflexion des roten Spektralbereichs durch die Reflexion des nahen Infrarots geteilt [HILDEBRANDT 1996].

$$RVI = \frac{NIR}{ROT}$$

Der RVI ist nur bedingt anwendbar, da bei dichter Vegetation der Wert für die Rot- Reflexion extrem klein ist und der RVI damit sehr groß wird [HUETE et al. 1994].

Zwei weitere einfache Ratio VI sind der Square Ratio (SQR) und der Log Ratio (LogR) [JÜRSCHIK 1998]. Der SQR ergibt sich aus der Quadratwurzel, der LogR aus dem Logarithmus des Quotienten von nahem Infrarot und Rot.

$$SQR = \sqrt{\left(\frac{NIR}{ROT}\right)}, \quad LogR = \log\left(\frac{NIR}{ROT}\right)$$

#### Der Moisture Stress Index (MSI)

Der MSI ergibt sich durch die Division der Reflexion des mittleren Infrarots durch die Reflexion des nahen Infrarots, wobei das nahe Infrarot Aufschluss über das Vorkommen von Biomasse und das mittlere Infrarot Aufschluss über das Vorkommen von Feuchte gibt. Ein hoher MSI ist ein Signal für trockene Vegetation [WILL 1996].

$$MSI = \frac{NIR}{MIR}$$

#### Der Normalized Difference Vegetation Index (NDVI)

Der NDVI ist neben dem RVI einer der am häufigsten verwendeten Vegetationsindizes für Untersuchungen der Vegetation im kontinentalen oder globalen Maßstab [HUETE et al. 1999].

Er berechnet sich aus dem Quotienten von Differenz und Summe der Strahldichten aus nahem Infrarot und rot und hat einen Wertebereich zwischen -1 und +1 [KONECNY 2003], [RUNDQUIST et al. 2002], [STEVEN & JAGGARD 1995].

$$NDVI = \frac{(NIR - ROT)}{(NIR + ROT)}$$

Der NDVI hat bei kleineren Signaldifferenzen eine höhere Auflösung als der RVI, ist somit sensibler und kann sehr geringe Vegetationsbedeckung bis hin zu gealterter oder toter Vegetation registrieren [HILDEBRANDT 1996]. Je größer der NDVI-Wert, desto höher sind Dichte, Masse und photosynthetische Aktivität der Vegetation [THEILEN-WILLIGE 1993]. Grüne Vegetation hat einen NDVI von +0,7 (rot), Wasser, unfruchtbare Böden und Wolken haben einen NDVI von -0,3 (blau) [KONECNY 2003]. Somit macht der NDVI saisonale Änderungen der Vegetation deutlich und kann zur Ertragsschätzung und zur Überwachung tropischer Vegetation und Waldabholzung eingesetzt werden [KONECNY 2003]. Abbildung 4 zeigt ein Beispiel für die saisonale Veränderung des NDVI im Sommer und im Herbst.

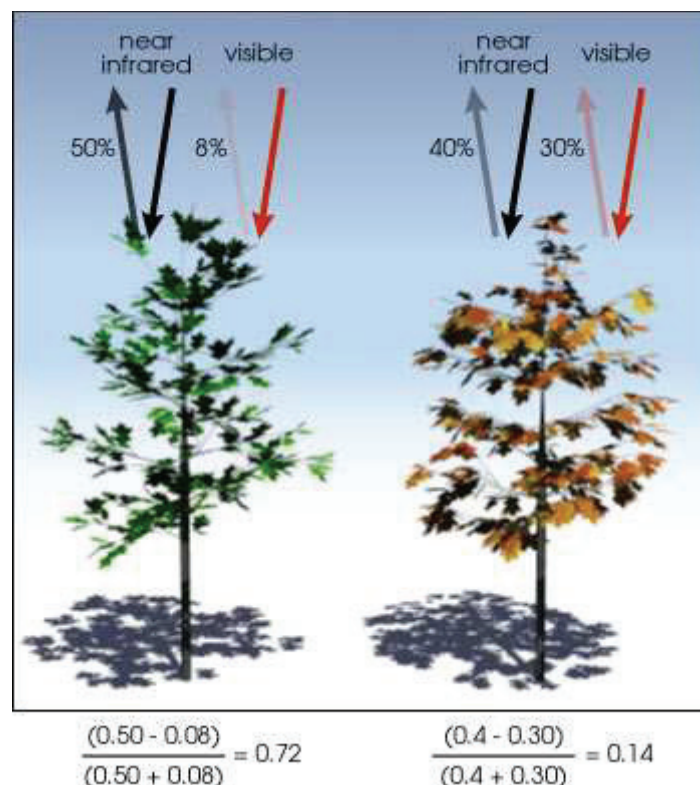


Abbildung 4: NDVI im Sommer und im Herbst [Quelle: NASA 2009]

Durch die Multiplikation einer Konstanten kann der Wertebereich vergrößert werden, durch die Addition einer Konstanten können negative Werte ausgeschlossen werden [BELWARD 1991a]. Bei starken atmosphärischen Einflüssen im sichtbaren Spektralbereich (z.B. erhöhter Wasserdampf- bzw. Aerosolgehalt, Wolken) kann der NDVI über eine Kombination des nahen und mittleren Infrarotbereiches berechnet werden [HILDEBRANDT 1996]. Da hier aber eine sensible Reaktion auf Temperatureigenschaften der Erdoberfläche auftritt, ist diese Form des NDVI nur im Ausnahmefall zu nutzen [BELWARD 1991a].

$$NDVI = \frac{(MIR - NIR)}{(MIR + NIR)}$$

Der NDVI ist abhängig von grüner Vegetationsbedeckung, vom grünen Blattflächenindex, von der Chlorophyllabsorption, von der grünen oberirdischen Phytomasse, von der Photosynthesekapazität und von der Primärproduktion [EKLUNDH 1998]. Er beschreibt den Zustand der Vegetation, zu dessen Berechnung keine zusätzlichen Informationen über die Umgebung nötig sind [BELWARD 1991a]. Ab einem LAI von 2 tritt eine Sättigung des NDVI auf, und es kommt zu sensiblen Reaktionen auf die Bodenreflexion [BELWARD 1991b]. Ein Nachteil des NDVI ist die fehlende Möglichkeit der Unterscheidung zwischen den verschiedenen Vegetationsformen [ANHUF 1997].

#### Der Modified Normalized Difference Vegetation Index (MNDVI)

Der MNDVI wurde 1987 bei der Untersuchung von Frostschäden in Griechenland entwickelt. Er berechnet sich aus der Reflexion des nahen Infrarots sowie des mittleren Infrarots.

$$MNDVI = \frac{(NIR - MIR)}{(NIR + MIR)}$$

Der MNDVI lässt Aussagen über den Zustand der Pflanzen zu. Bei Störungen durch äußere Einflüsse oder Alterung sinkt die Reflexion im nahen Infrarot. Die Reflexion im mittleren Infrarot hängt stark vom totalen Wassergehalt der Pflanze ab, so dass bei steigendem Wassergehalt die Reflexion sinkt und die Absorption ansteigt [JÜRGENS 1997].

Der MNDVI nimmt bei unbewachsenen Böden und Vegetation unter Stress gleiche Werte an und stellt somit einen guten Indikator für die Erkennung von Pflanzenstress dar. Die Werte des MNDVI befinden sich sowohl bei unbewachsenen Böden als auch bei trockener Vegetation im negativen Bereich und ergeben somit positive Werte bei bewässerten Gebieten, Gebieten mit grüner Vegetation und bei Wasserflächen [JÜRGENS 1997].

### 2.2.3.1.2 Orthogonal Vegetationsindizes

#### Der Green Vegetation Index (GVI)

Der GVI beruht auf Landsat TM-Daten und berechnet sich nach PRICE et al. [2002] und TODD et al. [1998] wie folgt:

$$GVI = -0,2728(TM1) - 0,2174(TM2) - 0,5508(TM3) + 0,7221(TM4) + 0,0733(TM5) + 0,1648(TM7)$$

Der GVI dient zur direkten Messung der Vegetationsfülle [TODD et al. 1998] und ist weniger anfällig gegenüber Bodenfeuchteinflüssen als der NDVI [PRICE et al. 2002].

Der Brightness Index (BI) ist ein Vegetationsindex, der die Bodenreflexion widerspiegelt und sich nach PRICE et al. [2002] und TODD et al. [1998] wie folgt berechnen lässt:

$$BI = -0,2909(TM1) + 0,2493(TM2) + 0,4806(TM3) + 0,5568(TM4) + 0,4438(TM5) + 0,1706(TM7)$$

Der Wetness Index (WI) reagiert auf den Feuchtegehalt der Vegetation und des Bodens und lässt sich nach PRICE et al. [2002] und TODD et al. [1998] folgendermaßen berechnen:

$$WI = 0,1446(TM1) + 0,1761(TM2) + 0,3322(TM3) + 0,3396(TM4) - 0,6210(TM5) - 0,4186(TM7)$$

#### Der Perpendicular Vegetation Index (PVI)

Der PVI wurde 1977 von RICHARDSON und WIEGAND entwickelt [RICHARDSON & WIEGAND 1977] mit dem Ziel, den Einfluss wechselnder Bodenreflexion zu reduzieren [HILDEBRANDT 1996].

Zur Berechnung des PVI werden die Differenzen der reflektierten Strahldichten des Bodens und der Vegetation quadriert und aus deren Summe die Wurzel gezogen. [HILDEBRANDT 1996].

$$PVI = \sqrt{(ROT_{Boden} - ROT_{Vegetation})^2 + (NIR_{Boden} - NIR_{Vegetation})^2}$$

Der NDVI nimmt aufgrund dunklerer Bodenoberflächen höhere Werte an. Beim PVI ist dieses genau umgekehrt, so dass hier bei helleren Böden höhere Werte auftreten [BROGE & LEBLANC 2000].

#### Der Weighted Difference Vegetation Index (WDVI)

Der WDVI hat das Ziel, durch die Bestimmung eines geeigneten Vegetationsindex für die Abschätzung des LAI, den Einfluss des Bodens zu vermindern [HUETE 1999]. Er berechnet sich nach BROGE & LEBLANC [2000] wie folgt:

$$WDVI = NIR - a * ROT \quad [a = \text{Parameter der spektralen Bodenlinie (Soil-Brightness-Line SBL)}]$$

#### **2.2.3.1.3 Hybrid Vegetationsindizes**

##### Der Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)

Hybridindizes sind eine Kombination von Pflanzen- und Bodenreflexion [BROGE & LEBLANC 2000]. Der SAVI hat das Ziel, die Vegetationsreflexion von der Bodenreflexion abzukoppeln [HUETE et al. 1999]. Er berücksichtigt die Bodenreflexion in nicht geschlossenem Bestand, da dieser den Einfluss der Bodenreflexion auf den Vegetationsindex verringert [JACOBI 2005]. Die Reflexionseffekte, die durch die Bodenfarbe ausgelöst werden, finden bei der Berechnung keine Berücksichtigung, es wird nur eine Korrektur der Bodenelligkeit vorgenommen [HUETE et al. 1994]. Der SAVI wird nach SCHOWENGERDT [2007] wie folgt berechnet:

$$SAVI = \frac{(NIR - ROT)}{(NIR + ROT + L)}(1 + L) \quad [L = \text{empirisch ermittelte Konstante zur Verminderung des Bodeneinflusses}]$$

Der Wertebereich des SAVI liegt zwischen -0,9 und 1,6 [EIDEN et al. 1991], [SCHOWENGERDT 2007].

#### Der Transformed Soil Adjusted Vegetation Index (TSAVI)

Der TSAVI wird aus dem SAVI abgeleitet und enthält zusätzlich die Parameter a und b [BARET et al. 1989], [BROGE & LEBLANC 2000], [EIDEN et al. 1991]. Der Wertebereich des TSAVI reicht von 0 bei kahlen Böden bis 1 bei sehr dichtem Bestand und ist gleich dem NDVI, wenn a=1 und b=0 ist [EIDEN et al. 1991]. Der TSAVI berechnet sich wie folgt:

$$TSAVI = \frac{(aNIR - aROT - b)}{(ROT + NIR - ab)} \quad [a, b = \text{Parameter der spektralen Bodenlinie (Soil-Brightness-Line SBL)}]$$

#### Der Modified Soil Adjusted Vegetation Index (MSAVI)

Der Wertebereich des MSAVI ist größer und dynamischer als der des SAVI [EKLUNDH 1998], [QI 1994]. Der MSAVI berechnet sich nach folgender Formel:

$$MSAVI = \frac{2NIR + 1 - \sqrt{(2ROT + 1)^2 - 8(NIR - ROT)}}{2}$$

TSAVI und MSAVI sind verbesserte Versionen des SAVI [HUETE et al. 1999].

### **2.2.3.1.4 Neue Vegetationsindizes**

#### Der Transformed Vegetation Index (TVI)

Der TVI wird vom NDVI abgeleitet und dient zur Beseitigung eventuell auftretender negativer Werte des NDVI durch Addition einer Konstanten.

$$TVI = \sqrt{\frac{(NIR - ROT)}{(NIR + ROT)}} + 0,5$$



### 2.2.3.1.5 Differenz Vegetationsindizes

#### Der Difference Vegetation Index (DVI)

Der DVI berechnet sich durch die Subtraktion des rot- reflektierten Anteils vom nahinfraroten Anteil [BROGE & LEBLANC 2000].

$$DVI = NIR - ROT$$

#### Der Difference Difference Vegetation Index (DD)

Der DD wurde mit dem Ziel entwickelt, einer Luftbildüberlagerung entgegenzuwirken [HILDEBRANDT 1996]. Bei diesem VI finden auch der grüne und blaue Spektralbereich Berücksichtigung [HILDEBRANDT 1996], Benachbarte Spektralbereiche werden dabei voneinander subtrahiert, was dazu führt, dass ein großer Teil vom additiven Effekt des Luftlichts eliminiert wird [HILDEBRANDT 1996].

$$DD = (2 * NIR - ROT) - (GRÜN - BLAU)$$

## 2.3 Aufnahmesysteme

Fernerkundungssysteme setzen sich aus einem Sensorsegment, einem Bodensegment und einem Veredlungssegment zusammen [DE LANGE 2002]. Das Sensorsegment besteht aus einer Plattform (Satellit, Flugzeug) und einem Sensor und dient der Gebietsabtastung, der Digitalisierung und Kodierung von Daten, der Speicherung auf Band und der Übertragung der Daten zum Bodensegment [DE LANGE 2002]. Das Bodensegment dient dem Empfang, der Aufbereitung (Systemkorrektur, Zusatzinfos, geometrische Korrektur) und der Archivierung der Daten und das Veredlungssegment dient der Interpretation und Darstellung der Daten in Form von visueller Interpretation und digitaler Bildverarbeitung [DE LANGE 2002]. Fernerkundungssysteme können in aktive und passive Systeme unterteilt werden.

### **2.3.1 Aktive Aufnahmesysteme**

Aktive Fernerkundungssysteme verwenden künstliche elektromagnetische Strahlung, die von einer Strahlungsquelle im Flugzeug oder Satelliten auf die Erdoberfläche ausgesandt, dort reflektiert und anschließend vom Sensor empfangen und gemessen wird [JI 2002], [THEILEN-WILLIGE 1993]. Zu den aktiven Aufnahmesystemen zählen Radar oder Laser [BALDENHOFER & MARSCHALL 2009]. Vorteile aktiver Fernerkundungssysteme sind die Nacht- und Tagtauglichkeit und die Unabhängigkeit von der Bewölkung.

### **2.3.2 Passive Aufnahmesysteme**

Passive Fernerkundungssysteme verwenden ausschließlich die natürliche elektromagnetische Strahlung [HILDEBRANDT 1996]. Die Strahlung wird auf der Erdoberfläche teilweise reflektiert und zum Sensor getragen, dieser erfasst und misst die Strahlung [THEILEN-WILLIGE 1993]. Am Tag reflektieren passive Systeme die Strahlung im Kurzwellenbereich und emittieren die Strahlung im Langwellenbereich, nachts finden nur Emissionen im Langwellenbereich statt [JI 2002]. Zu den passiven Aufnahmesystemen gehören zum Beispiel die Multispektralscanner [BALDENHOFER & MARSCHALL 2009].

## **2.4 Auflösung**

Die photographische Auflösung eines Sensors wird eingeteilt in räumliche, spektrale, radiometrische und zeitliche Auflösung.

### **2.4.1 Räumliche Auflösung**

Die räumliche Auflösung gibt die Fläche am Boden an, die von einem Pixel des Sensors repräsentiert wird [JACOBI 2005]. Je mehr Pixel pro Flächeneinheit am Boden auftreten, desto kleiner sind die Objekte, die von ihrer Umgebung abgegrenzt werden können [JACOBI 2005]. Die räumliche Auflösung ist abhängig von Empfängergröße, Sensorhöhe und Systemkonfiguration [JI 2002], [STREIT 2009]. Eine höhere räumliche Auflösung kann durch eine

niedrigere Flughöhe und einen größeren Maßstab erreicht werden [THEILEN-WILLIGE 1993]. Gering auflösende Satellitenbilder können nur zwischen Wald- und Nichtwaldflächen unterscheiden, hoch auflösende Satellitenbilder lassen auch die Unterscheidung von Einzelbäumen zu, Luftbilder mit höchster räumlicher Auflösung liefern sogar Informationen über die Aststruktur eines Baumes [KOUKAL 2001]. Die räumliche Auflösung wird in Meter (m)

angegeben [DE LANGE 2002]. Abbildung 5 zeigt Ausschnitte von Bildern, die mit Sensoren in verschiedenen räumlichen Auflösungen aufgenommen wurden.

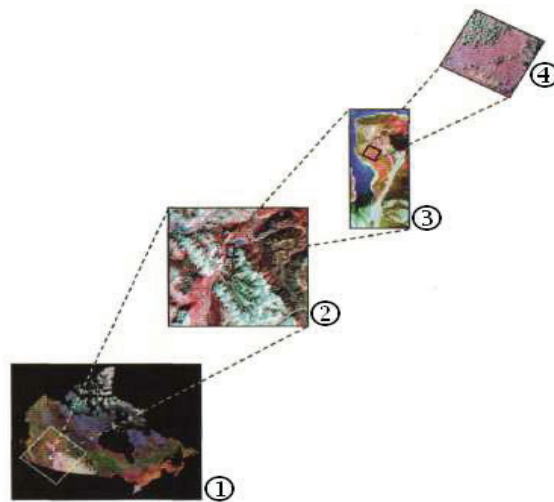


Abbildung 5: räumliche Auflösung verschiedener Sensoren

(① geringe räumliche Auflösung, ② mittlere räumliche Auflösung, ③ und ④ hohe räumliche Auflösung) [Quelle: FRANKLIN 2001, verändert]

### 2.4.2 Spektrale Auflösung

Die spektrale Auflösung gibt die Anzahl von Wellenlängenbändern an, für die ein Sensor empfindlich ist [JACOBI 2005]. Hat ein Aufnahmesystem wenig spektrale Bänder, so spricht man von einem multispektralen System, hat ein System viele spektrale Bänder, so spricht man von einem hyperspektralen System [JI 2002]. Die spektrale Auflösung ermöglicht die Unterscheidung von verschiedenen Oberflächen anhand ihrer spezifischen Reflexionseigenschaften [KOUKAL 2001].

### 2.4.3 Radiometrische Auflösung

Die radiometrische Auflösung wird durch die Anzahl der Grauwerte für die Wiedergabe der Rückstrahlung bestimmt [DE LANGE 2002]. Sie ist die Fähigkeit des Sensors, die eingehende Strahlung, die vom Objekt reflektiert oder emittiert wird, zu berechnen [JI 2002]. Der Wertebereich liegt üblicherweise bei 8 Bit, welcher 256 Grauwerten zwischen 0 und 255 entspricht [STREIT 2009].

### 2.4.4 Zeitliche Auflösung

Die zeitliche Auflösung gibt an, wie oft ein System Bilder einer bestimmten Region wiederholt aufnehmen kann [DE LANGE 2002], [JI 2002], [THEILEN-WILLIGE 1993], [JACOBI 2005]. Sie ist abhängig von der Höhe der Umlaufbahn des Satelliten [STREIT 2009].

## 2.5 Plattformen und Sensoren

### 2.5.1 Flugzeuggestützte Plattformen und Sensoren

Die Flugzeugplattform ist die klassische Sensorplattform [KONECNY 2003]. Die Befliegung erfolgt in parallelen Streifen von Ost nach West mit einer Längsüberlappung von 20 bis 30 % und einer Querüberlappung von 60 % [KONECNY 2003].

Flugzeuggetragene Sensoren haben eine höhere räumliche und spektrale Auflösung als Satellitensensoren [FRANKLIN 2001], [LAFSKY & COHEN 2003]. Die Aufnahme hoch auflösender Bilder bis 10x10 Pixel ist möglich [ALTHAUSEN 2002]. Aufgrund ihrer geringen Flughöhe sind sie weniger wetterabhängig als Satelliten, da sie unter den Wolken geflogen werden können und somit eine Datensammlung zu jeder Jahreszeit ermöglichen [STEVEN & JAGGARD 1995], [FRANKLIN 2001], [LAFSKY & COHEN 2003]. Flugzeuggestützte Fernerkundung ermöglicht die gleichzeitige Aufnahme von DGPS (differentielles Global Positioning System) –Informationen und Informationen aus der Inertialnavigation sowie eine genaue Georeferenzierung [ALTHAUSEN 2002]. Die Flugzeugsensoren sind technisch fortgeschrittener und haben eine höhere Qualität und eine längere Belichtungszeit als Satellitensensoren [FRANKLIN 2001], [LAFSKY & COHEN 2003].

Allerdings hat die flugzeuggestützte Fernerkundung nicht nur Vorteile gegenüber den Satelliten, sondern auch Nachteile. Hier ist zum Beispiel die geringere Flächenbedeckung aufgrund der geringen Flughöhe zu nennen, so dass viele Überflüge nötig sind, um die gleiche Fläche abzudecken wie ein Satellit [ALTHAUSEN 2002]. Außerdem sind bei Flugzeugaufnahmen aufgrund der Flugbewegung und der Neigung des Flugzeugs die geometrischen Verzerrungen höher als beim Satelliten [ALTHAUSEN 2002]. Die Bilder müssen bei der Auswertung radiometrisch korrigiert werden [LAFSKY & COHEN 2003]. Weiterhin kommt es bei der luftgestützten Fernerkundung zu einem Verlust der Datenqualität durch die Veränderlichkeit der Beleuchtung [STEVEN & JAGGARD 1995]. Die Tabellen 5 bis 7 geben eine Übersicht über einige flugzeuggetragene Sensoren.

Tabelle 5: Flugzeuggestützte Sensoren Teil 1 [Quelle: ALTHAUSEN 2002, verändert]

Sensoren		Airborne Data Acquisition and Registration System 5500 (ADAR 5500)	Airborne Multispectral Digital Camera (AMDC)	Daedalus Airborne Multi-spectral Scanner (AMS)	
Kanäle [µm]	B	4 programmierbare Bänder zwischen 0,400 (blau) und 1,000 µm (NIR)	0,410-0,486	0,42-0,45 und 0,45-0,52	
	G		0,508-0,559	0,52-0,60	
	R		0,605-0,700	0,60-0,63 und 0,63-0,69	
	NIR		0,790-1,000	0,69-0,75; 0,76-0,90 und 0,91-1,05	
	MIR		-	-	
	TIR		-	-	3,00-5,50 und 8,50-12,5
	Pan		-	0,410-0,650	-
IFOV [mrad]		0,44	0,32	2,5	
Räumliche Auflösung [m]		0,5	0,5-3	abhängig von Flugmission	
Bildfeld [Pixel]		1.550 x 1.000	2.000 x 2.000	714	
Anwendungsbereiche		forstwirtschaftliche Anwendungen, Precision Farming	Hydrologie, Precision Farming, Waldinventarisierung, Umwelteinflüsse	keine Angaben	

Tabelle 6: Flugzeuggestützte Sensoren Teil 2 [Quelle: ALTHAUSEN 2002, verändert]

Sensoren		Airborne Imaging Spectroradiometer for Applications (AISA)	Compact Airborne Spectrographic Imager-2 (CASI-2)	Airborne Visible-Infrared Imaging Spectrometer (AVIRIS)
Kanäle [µm]	B	0,430 (blau) bis 0,900 (NIR)	19 bis 288 program- mierbare Bänder zwischen 0,400 (blau) und 1,000 (NIR)	224 Bänder zwischen 0,400 (blau) und 2,500 (MIR)
	G			
	R			
	NIR			
	MIR	-	-	-
	TIR	-	-	-
	Pan	-	-	-
IFOV [mrad]		1,0	1,34	1,0
Räumliche Auflösung [m]		abhängig von Flugmission	0,5-3	abhängig von Flugmission
Bildfeld [Pixel]		364	512	614
Anwendungs- bereiche		Precision Farming, Korallenriffkartierung	forst- und landwirt- schaftliche Anwen- dungen, Umweltstu- dien (Gesundheit und Stress von Vegetation)	Küstenkartierung, Geologie, Mineralogie

Tabelle 7: Flugzeuggestützte Sensoren Teil 3 [Quelle: ALTHAUSEN 2002, verändert]

Sensoren	Airborne Oceanographic LIDAR-3 (AOL-3)	Airborne Topographic Mapper (ATM)
Kanäle [µm]	0,355 (ultraviolett) - 0,532 (grün)	0,523 (grün)
IFOV [mrad]	1,0	2,1
Räumliche Auflösung [m]	keine Angaben	keine Angaben
Bildfeld [Pixel]	keine Angaben	keine Angaben
Anwendungs- Bereiche	Beobachtung der Meeresoberflächen	Kartierung von Strandprofilen in den USA

### 2.5.2 Satellitengestützte Plattformen und Sensoren

Die satellitengestützte Fernerkundung unterscheidet zwischen Satelliten mit sonnensynchroner oder geostationärer Umlaufbahn [KONECNY 2003], [ALTHAUSEN 2002].

Geostationäre Satelliten befinden sich in ca. 36.000 km Höhe und haben eine Umlaufzeit von 24 Stunden [THEILEN-WILLIGE 1993]. Ein System von 5 Satelliten ermöglicht es, in 15 bis 30 Minuten die gesamte Erde abzutasten [BALDENHOFER & MARSCHALL 2009]. Zu den geostationären Satelliten gehören GOES-Ost (USA) für den Westatlantik und Nord- und Südamerika, GOES-West (USA) für den Ostpazifik und das westliche Nordamerika, Meteosat (Europa) für Afrika, den Ostatlantik, den Nahen Osten und Europa, GMS (Japan) für den Westpazifik, Ostasien und Australien und INSAT (Indien) für den Indischen Ozean, Asien, Ostafrika und die Arabische Halbinsel [BALDENHOFER & MARSCHALL 2009].

Die meisten Satelliten sind jedoch nicht geostationär, sondern umrunden die Erde auf unterschiedlichen polnahen Umlaufbahnen [STREIT 2009]. Diese sonnensynchronen Satelliten befinden sich in 800 bis 900 km Höhe [THEILEN-WILLIGE 1993]. Sie haben den Vorteil, dass ihre Fluggeschwindigkeit nicht durch die Drehgeschwindigkeit der Erde gegeben ist, so wie es bei den geostationären Satelliten der Fall ist [BALDENHOFER & MARSCHALL 2009]. Zu den sonnensynchronen Satelliten gehören zum Beispiel Landsat (USA), SPOT (Frankreich) und IRS (Indien) [KONECNY 2003]. Sonnensynchrone Satelliten besitzen die Fähigkeit, die gesamte Erde alle 12 Stunden in zeitlich versetzten Beobachtungstreifen vollständig abzutasten [BALDENHOFER & MARSCHALL 2009]. Jeder Bahnpunkt wird immer um die gleiche Tageszeit überflogen [ZABEL 1975].

Satelliten haben eine höhere Flugbahn als flugzeuggestützte Systeme und können dadurch größere Flächen abdecken [ALTHAUSEN 2002], [THEILEN-WILLIGE 1993]. Weiterhin haben sie eine gegenüber den flugzeuggestützten Systemen verbesserte Datenqualität [STEVEN & JAGGARD 1995] mit nur geringen geometrischen Verzerrungen [ALTHAUSEN 2002] und ermöglichen eine objektive und schnelle Datenauswertung und eine gute Datenintegration in ein GIS (Geoinformationssystem) [THEILEN-WILLIGE 1993].

Die satellitengestützte Fernerkundung ist in ihrer Entwicklung weitaus schneller vorangeschritten als die luftgestützte Fernerkundung [HOWARD 1991]. Satellitendaten eignen sich zur Beobachtung von plötzlich auftretenden Veränderungen (Sturm, Feuer), zur Beobachtung allmählicher Veränderungen, die sich über eine kurze Zeitspanne ereignen (Zerstörung durch Schädlinge) oder die Beobachtung allmählicher Veränderungen, die sich über eine lange Zeitspanne ereignen (Waldsterben) [HOWARD 1991].

Benachteiligt sind Satelliten unter anderem durch eine schlechte Reparaturmöglichkeit vor Ort [ALTHAUSEN 2002] und die Begrenzung der räumlichen Auflösung [THEILEN-WILLIGE 1993]. Weiterhin sind einige Satelliten aufgrund ihrer zeitlichen Auflösung wochenlang nicht sichtbar, andere nur einmal am Tag, so dass das zu messende Phänomen nicht (mehr) vorhanden ist [LAFSKY & COHEN 2003].

Außerdem wird die Auswertung von Satellitenbildern durch atmosphärische Störungen erschwert [SEMMT 2002]. Die Tabellen 8 bis 11 geben eine Übersicht über einige satellitengetragene Sensoren.



Tabelle 8: Satellitengestützte Sensoren Teil 1 [Quelle: nach ALTHAUSEN 2002, BAKKER 2001, TLWJF 2003, WEGEHENKEL 2006, STREIT 2009, COENRADIE 2003, SEMMT 2002]

Satellit		Landsat 1-5	Landsat 4/5	Landsat 7
Sensoren		Multispectral Scanner (MSS)	Thematic Mapper (TM)	Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+)
Kanäle [µm]	B	-	0,45-0,52	0,450-0,515
	G	0,5-0,6	0,52-0,60	0,525-0,605
	R	0,6-0,7	0,63-0,69	0,630-0,690
	NIR	0,7-0,8 und 0,8-1,1	0,76-0,90	0,750-0,900
	MIR	-	1,55-1,75 und 2,08-2,35	1,550-1,750 und 2,090-2,350
	TIR	-	10,4-12,5	10,40-12,50
	pan	-	-	0,530-0,900
Räumliche Auflösung [m]		79 x 56	30 x 30 (Bänder 1-5,7) 120 x 120 (Band 6)	30 x 30 (Bänder 1-5,7) 60 x 60 (Band 6) 15 x 15 (Band 8)
Zeitliche Auflösung		18 Tage (Landsat 1-3) 16 Tage (Landsat 4,5)	16 Tage	16 Tage
Radiometrische Auflösung		8 bit	8 bit	8 bit
Streifenbreite [km]		185	185	185
Anwendungsbereiche		Landnutzung, Geologie, Hydrologie	Klassifikation von Fruchtarten, Bestimmung von Vegetationsindizes	Kartierung von Landbedeckung, Landnutzung, Boden, Geologieanwendungen, Meeresoberflächentemperatur

Tabelle 9: Satellitengestützte Sensoren Teil 2 [Quelle: nach ALTHAUSEN 2002, BAKKER 2001, TLWJF 2003, COENRADIE 2003 (SPOT); ALTHAUSEN 2002, BAKKER 2001, TLWJF 2003, WEGEHENKEL 2006, COENRADIE 2003 (Ikonos); ALTHAUSEN 2002, WEGEHENKEL 2006, STREIT 2009 (Terra)]

Satellit		SPOT	Ikonos-2	Terra
Sensoren		High Resolution Visible (HRV) / High Resolution Visible and Infrared (HRVIR)	High Resolution Visible (HRV) / High Resolution Visible and Infrared (HRVIR)	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS)
Kanäle [µm]	B	-	0,45-0,52	20 Bänder: 0,4 (blau) bis 3,0 (MIR)
	G	0,50-0,59	0,52-0,60	
	R	0,61-0,68	0,63-0,69	
	NIR	0,79-0,89	0,76-0,90	
	MIR	1,58-1,75 (SPOT-4)	-	16 Bänder: 3,0-15
	TIR	-	-	
	pan	0,51-0,73 (SPOT-1, 2, 3) 0,61-0,68 (SPOT-4)	0,45-0,90	
Räumliche Auflösung [m]		20 x 20 (multispektral) 10 x 10 panchromatisch	4 x 4 (multispektral) 1 x 1 (panchromatisch)	250 x 250 (Band 1-2) 500 x 500 (Band 3-7) 1.000 x 1.000 Band 8-36)
Zeitliche Auflösung		1-5 Tage	1,5-3 Tage	1-2 Tage
Radiometrische Auflösung		8 bit	11 bit	keine Angabe
Streifenbreite [km]		60	11	2.700
Anwendungsbereiche		Precision Farming, Untersuchungen natürlicher Ressourcen, Überwachung der Landmasse der Erde	Stadtplanung, Untersuchungen natürlicher Ressourcen, Katastrophenmanagement, Precision Farming, topographische Kartierungen mittleren Maßstabs	Ozeanographie, Untersuchung der Erdoberfläche und der Atmosphäre

Tabelle 10: Satellitengestützte Sensoren Teil 3 [Quelle: nach ALTHAUSEN 2002, BAKKER 2001, WEGEHENKEL 2006, STREIT 2009 (NOAA); THEILEN-WILLIGE 1993, STREIT 2009 (METEOSAT)]

Satellit		NOAA	Meteosat
Sensoren		Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR)	keine Angabe
Kanäle [µm]	B	-	0,5-0,9 (blau bis NIR)
	G	-	
	R	0,580-0,680	
	NIR	0,725-1,100	
	MIR	-	-
	TIR	3,550-3,930 und 10,30-11,30 und 11,50-12,50 (nicht auf NOAA-6,8,10)	5,7-7,1 und 10,5-12,5
	pan	-	-
Räumliche Auflösung [m]		1.100 x 1.100	2.500 (blau bis NIR) 5.000 (TIR)
Zeitliche Auflösung		täglich	30 Minuten
Radiometrische Auflösung		10 bit	8 bit
Streifenbreite [km]		2.700	2.700
Anwendungsbereiche		Beobachtung von Umweltveränderungen, meteorologische Vorhersagen, Klimaüberwachung, Wolkenbedeckungskarten zur Niederschlagsschätzung, NDVI-Karten	Wolkenbewegung, Windbewegung, Meeresoberflächentemperatur, Klima, Niederschlag

Tabelle 11: Satellitengestützte Sensoren Teil 4 [Quelle: nach THEILEN-WILLIGE 1993, WEGEHENKEL 2006, STREIT 2009, KLENKE 1999 (ERS); TLWJF 2003, STREIT 2009, COENRADIE 2003, SEMMT 2002 (IRS); DIGITAL GLOBE 2009, WIKIPEDIA 2008a, TLWJF 2003, COENRADIE 2003 (QuickBird)]

Satellit		ERS-1	IRS-1C/1D	QuickBird
Sensoren		Synthetic Aperture Radar (SAR)	Linear Imaging Self Scanning Sensor (LISS), Panchromatic Sensor (PAN)	keine Angabe
Kanäle [µm]	B	ERS ist ein aktives Radarsystem, welches im Mikrowellenbereich arbeitet	-	0,450-0,520
	G		0,52-0,59	0,520-0,600
	R		0,62-0,68	0,630-0,690
	NIR		0,77-0,86	0,760-0,900
	MIR		1,55-1,75	-
	TIR		-	-
	pan		0,50-0,75	0,445-0,900
Räumliche Auflösung [m]		30	23,6 (multispektral), 70,8 (MIR) 5,8 (panchromatisch)	0,61 (panchromatisch), 2,4 (multispektral)
Zeitliche Auflösung		3-35 Tage	24 Tage, bei Schwenkung 5 Tage	2-3 Tage
Radiometrische Auflösung		8 bit	7 bit (multispektral), 6 bit (panchromatisch)	11 bit
Streifenbreite [km]		100	142 (multispektral), 70 (panchromatisch)	16,5
Anwendungsbereiche		Boden- und Vegetationsuntersuchungen (Feuchtigkeit)	Landnutzung, Geologie, Hydrologie	Aktualisierung von topographischen Karten, Generierung von Höhenmodellen, Landnutzungskartierung, Veränderungsanalysen, Precision Farming, Stadtentwicklung

## 2.6 Möglichkeiten der Datenbeschaffung

Für Anwendungen, die anhand von Luftbildern durchgeführt werden sollen, kann zunächst geprüft werden, ob zweckerfüllende Luftbilder bereits in Archiven von Landesvermessungsämtern, Behörden oder Verbänden für Landes- und Stadtplanung und Forstbehörden vorhanden sind [ALBERTZ 2007]. Luftbilder stehen in Deutschland und den USA in analoger oder digitaler Form uneingeschränkt zur Verfügung, in anderen Ländern sind diese teilweise nicht für die Öffentlichkeit zugänglich [ALBERTZ 2007]. Dieses Bildmaterial ist meist kostengünstiger, aber oftmals auch bereits veraltet, nicht immer im benötigten Maßstab oder nicht zum notwendigen Befliegungszeitpunkt vorhanden [HILDEBRANDT & PEERENBOOM 1984].

Falls keine geeigneten Luftbilder verfügbar sind, wird eine neue Befliegung in Auftrag gegeben [HILDEBRANDT & PEERENBOOM 1984]. Diese wird in Deutschland von Privatfirmen, in anderen Ländern auch durch staatliche Einrichtungen durchgeführt [ALBERTZ 2007]. Bevor eine Befliegung durchgeführt wird, hat der Auftraggeber die Möglichkeit, neben den technischen Bedingungen Parameter wie Befliegungszeitpunkt, zu befliegendes Gebiet, Maßstab, Filmart, Umwelt- und Witterungsbedingungen (zu tolerierende Wolken- oder Schattenbedeckung) sowie das Datenverarbeitungsniveau (radiometrische Kalibrierung, Georeferenzierung) vorzugeben [ALBERTZ 2007], [HOWARD 1991], [FRANKLIN 2001].

Die Beschaffung von Satellitendaten erfolgt hauptsächlich über das Internet, da heutzutage alle staatlichen und kommerziellen Satellitenbildvertreiber eine Internetpräsenz haben [GRENZDÖRFFER et al. 2000]. Hier können sich potentielle Nutzer, teilweise gebührenpflichtig, in den Archiven umsehen und Satellitenbilder auf Grundlage von so genannten Quicklooks bestellen [SEMMT 2002], [GRENZDÖRFFER et al. 2000]. Quicklooks sind Abbilder von Satellitenbildern, welche in ihrer Geometrie und Radiometrie sehr stark vergrößert sind [SEMMT 2002]. Anhand der Quicklooks kann geprüft werden, ob das gewünschte Gebiet vom Satelliten erfasst wurde und wie stark die Bildverarbeitung durch Wolken behindert sein könnte [SEMMT 2002].

Quicklooks erhält man von den Vertreiberfirmen für Satellitendaten wie der NASA oder der ESA, von Forschungseinrichtungen, wie dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) oder vom amerikanischen EROS Data Center des United States Geological Survey (USGS) [DE LANGE 2002], [SEMMT 2002]. Zu beachten ist aber, dass nichtkommerzielle Archive nur eine unvollständige Einsicht in die vorhandenen Daten aller Systeme geben können, so dass für eine vollständige Übersicht der Zugriff auf ein kommerzielles Datenarchiv notwendig ist [SEMMT 2002]. Hierzu gehören in Deutschland die Gesellschaft für angewandte Fernerkundung (GAF) oder Eurimage [SEMMT 2002].

In Zukunft sollen neue übergeordnete Suchmaschinen mit einheitlichem User Interface entwickelt werden, um damit dem Nutzer den Zugang zu den Archiven vieler staatlicher und kommerzieller Satellitenbetreiber zu ermöglichen [GRENZDÖRFFER et al. 2000]. Hierzu gehören beispielsweise das ImageNet der Firma Core Software oder die Suchmaschine INFEO der EU [GRENZDÖRFFER et al. 2000]. Tabelle 12 gibt eine Übersicht über Bezugsadressen von Satellitendaten im Internet.

Tabelle 12: Übersicht über Bezugsadressen von Satellitendaten im Internet [Quelle: DE LANGE 2002]

URL	Organisation	Daten
<a href="http://www.dlr.de">www.dlr.de</a>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)	Landsat, IRS-1C/1D, AVHRR, NDVI-Produkte, MOS, ERS-SAR, X-SAR, MOMS, GOME
<a href="http://www.dfd.dlr.de">www.dfd.dlr.de</a>		
<a href="http://www.eoweb.de">www.eoweb.de</a>		
<a href="http://earthnet.esrin.esa.it">earthnet.esrin.esa.it</a>	European Space Agency (ESA)	ERS, Envisat, Landsat, NOAA
<a href="http://www.eumetsat.de">www.eumetsat.de</a>	Europe's Meteorological Satellite Organization, Eumetsat	Meteosat, meteorologische Daten
<a href="http://www.eurimage.com">www.eurimage.com</a>	Eurimage	Landsat, ERS, Ikonos, IRS, AVHRR, Radarsat, QuickBird
<a href="http://www.spotimage.fr">www.spotimage.fr</a>	SPOT-Image	SPOT
<a href="http://www.euromap.de">www.euromap.de</a>	Euromap Satellitendatenvertriebsgesellschaft mbH	IRS-1C/1D
<a href="http://www.gaf.de">www.gaf.de</a>	Gesellschaft für angewandte Fernerkundung	Landsat, ERS, Ikonos, IRS, AVHRR, Radarsat
<a href="http://www.si-eu.com">www.si-eu.com</a>		
<a href="http://www.digitalglobe.com">www.digitalglobe.com</a>	Earth Watch Incorporated	QuickBird
<a href="http://www.usgs.gov/">http://www.usgs.gov/</a>	USGS, EROS Data Center	Landsat TM und MSS, AVHRR, SPOT

## **2.7 Ground Truth-Daten und Geoinformationssysteme**

### Ground Truth-Daten

Fernerkundungsdaten können ohne Referenzdaten nicht ausgewertet werden [JACOBI 2005]. Hierfür sind sogenannte Ground Truth-Daten notwendig. Ground Truth ist die Bezeichnung für Informationen, die durch Geländeerkundung am Boden aufgenommen wurden [WIKIPEDIA 2007]. Diese Informationen dienen der Analyse und Klassifikation von Fernerkundungsdaten, so dass Mehrdeutigkeiten (z.B. Unterscheidung von Mais- und Sonnenblumenfeldern) bei der Interpretation der Fernerkundungsdaten verhindert werden können [WIKIPEDIA 2007]. Ground Truth-Daten können nach ZILLMANN [1999] aus vorhandenem topographischem, geologischem und sonstigem Kartenmaterial und aus Geländebegehungen, -proben und -messungen gewonnen werden. Die erhobenen Ground Truth Daten können in ein Geoinformationssystem (GIS) eingegeben und georeferenziert (= einem Bildelement eine genaue geographische Position zuweisen) werden [VOß 2005].

### Geoinformationssysteme (GIS)

„Ein Geoinformationssystem ist ein rechnergestütztes System, das aus Hardware, Software, Daten und den Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst, gespeichert, verwaltet, aktualisiert, analysiert und modelliert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden.“ [DE LANGE 2002]

Das wesentliche Merkmal eines GIS ist die geographische Referenz aller Daten. So können im GIS die am Boden aufgenommenen Ground Truth-Daten und die mit Hilfe von Flugzeugen oder Satelliten aufgenommenen Fernerkundungsdaten miteinander verschnitten und analysiert werden.

### **3. Landwirtschaft**

Die Landwirtschaft ist heute hoch entwickelt und dient neben der Nahrungsmittelerzeugung auch der Erhaltung und Pflege von Kulturlandschaften und der Sicherung natürlicher Lebensgrundlagen. Die Fernerkundung kann hierfür die notwendige Datengrundlage für eine ressourcen- und umweltschonende Entwicklung liefern [BORG & KLISCH 2006]. Mit Hilfe der Fernerkundung können mit relativ geringem Aufwand Informationen über Veränderungen des Bodens und in Pflanzenbeständen gewonnen und dadurch der Betriebsmitteleinsatz und andere wichtige landwirtschaftliche Maßnahmen abgeleitet und effektiv durchgeführt werden.

#### **3.1 Pflanzenbau**

##### **3.1.1 Fernerkundung zur Untersuchung der Feldheterogenität**

„Jedem Landwirt ist bewusst, dass seine Schläge keine Flächen mit einheitlichen Eigenschaften sind. Die Natur hält sich nicht an Besitz- oder Bebauungsgrenzen und verteilt Bodenart oder auch Nährstoffe unregelmäßig über die Schläge. Betrachtet man einen Schlag aus der Luft, werden diese Unterschiede besonders deutlich. Bodenart, Nährstoffverfügbarkeit, Humusgehalt usw. führen zu Flächen unterschiedlicher Ertragsfähigkeit.“ [EBEL & GRAFF 1994]

Strukturwandel und Flurbereinigung führten in den letzten Jahrzehnten zur Zusammenlegung kleiner Flächen zu größeren Nutzungseinheiten, was wiederum zur Ausbreitung flächeninterner Heterogenitäten führte [TLL & DJO 2000], [VOß 2005]. Je größer ein landwirtschaftlich genutztes Feld ist, desto höher ist die Heterogenität, schon bei einer Fläche von 10 ha ist die Variabilität einzelner Bodenmerkmale sehr hoch [TLL & DJO 2000].

Nur 3 % aller deutschen Bodenflächen sind homogen [HERBST & LAMP 1998]. Jeweils 44 % der Bodenflächen sind mäßig bzw. normal heterogen und 9 % der Böden sind sehr heterogen [HERBST & LAMP 1998].

Eine Beseitigung der Heterogenität wäre durch Feldteilung möglich, doch die daraus entstehenden kleineren Bewirtschaftungsflächen würden die Konkurrenzfähigkeit auf dem Welt-



markt gefährden, so dass eine Teilung nicht ohne weiteres möglich ist [TLL & DJO 2000]. Eine gute Alternative hierfür ist Precision Farming [TLL & DJO 2000].

Ursachen für die Heterogenität eines Feldes sind externe Faktoren, wie Schatten, Schädlinge oder seitliche Nährstoffzufuhr und das Relief, welches einen entscheidenden Parameter für die Variabilität des Mikroklimas darstellt [LAMP et al. 1998], [SCHRÖDER 1998]. Weitere Parameter, die für die Analyse der Heterogenität eine Rolle spielen, sind die Bodenart, die Bodenform, die Bodendichte, der Humusgehalt, die Humusqualität, die vorhandenen Nährstoffe sowie der Wasserhaushalt [LAMP et al. 1998], [SCHRÖDER 1998], [VOß 2005].

Die Bodenart, der Humusgehalt, die Humusqualität und der Wasserhaushalt können sich im Laufe der Zeit verändern und sind somit kartierbar [LAMP et al. 1998]. Fernerkundungsaufnahmen zeigen Abweichungen zum üblichen Reflexionsverlauf an und machen somit Heterogenitäten im Feld deutlich [VISTA 2005]. Die Bodenheterogenität ist erkennbar am unterschiedlichen Reflexionsverhalten trockener und feuchter Böden, da hierdurch Rückschlüsse auf die Bodenart ermöglicht werden [GRENZDÖRFFER 1998]. Die Bodenart ist auch über den im Boden auftretenden Tongehalt bestimmbar [LAMP et al. 1998]. Über die organische Substanz eines Bodens, welche bevorzugt in Senken auftritt [SCHRÖDER 1998], kann der Humusgehalt bestimmt werden [LAMP et al. 1998].

Für die Analyse der Bodenheterogenität mittels Fernerkundung müssen die Böden schnee- und frostfrei, frisch und leicht trocken [GRENZDÖRFFER 1998] sowie möglichst vegetationslos sein, da so ein unverfälschtes Ergebnis hinsichtlich des spektralen Abbildes des Bodens und dessen chemischen und physikalischen Eigenschaften erzielt werden kann [TLL & DJO 2000].

Die fernerkundungsbasierte Untersuchung der Bodenheterogenität sollte kostengünstig und problemspezifisch, die Aufnahmen sollten schnell verfügbar und georeferenziert sein [GRENZDÖRFFER 1998].

Die satellitengestützte Fernerkundung eignet sich für die Untersuchung der Bodenheterogenität [SCHRÖDER 1998]. Allerdings reicht die räumliche Auflösung der meisten Satelliten oftmals nicht aus. Für die Untersuchung kleinräumiger Heterogenitäten wäre eine räumliche

Auflösung von 2 m notwendig [TLL & DJO 2000], diese wird jedoch bisher nur von den Sensoren des Ikonos-2 und QuickBird erfüllt, welche im panchromatischen Bereich eine räumliche Auflösung von 1 m bieten. Ansonsten stellen die Sensoren von SPOT und IRS mit Auflösungen von 10 bzw. 5,8 m im panchromatischen Bereich das bestauflösende Material dar und liefern akzeptable Ergebnisse [TLL & DJO 2000].

Auch die zeitliche Auflösung der Satelliten ist nicht optimal, so dass nur wenige wolkenfreie Aufnahmen pro Jahr möglich sind [LAMP et al. 1998]. Die schnelle Datenverfügbarkeit ist aufgrund der mehrere Wochen dauernden Vorprozessierung der Daten nicht erfüllbar [GRENZDÖRFFER 1998]. Auch die Anforderung an den Preis kann zum Großteil nicht erfüllt werden [SCHRÖDER 1998], so dass die fernerkundliche Heterogenitätsanalyse nur für große Betriebe effizient ist [GRENZDÖRFFER 1998].

Flugzeuggestützte Sensoren können zum Teil bessere Auflösungen erreichen und somit eine Erfassung kleinräumiger Strukturen ermöglichen [TLL & DJO 2000]. Luftbilder werden von den Landesvermessungsämtern meistens im Frühjahr in Auftrag gegeben, da zu diesem Zeitpunkt wenig Pflanzenbedeckung herrscht und somit Humusgehalt, Feuchtigkeit und die Struktur des Bodens bestimmt werden können [LAMP et al. 1998].

### **3.1.2 Fernerkundung in der Pflanzenproduktion**

Die Fernerkundung kann im Pflanzenbau vielfältig eingesetzt werden, so ist es zum Beispiel möglich, Aussagen über die Schädigung von Einzelpflanzen zu treffen oder überregionale Ernteabschätzungen durchzuführen [DLR 2009]. Weiterhin können mit Hilfe der Fernerkundung Rückschlüsse auf Bodeneigenschaften, Verunkrautung, Witterung und Pflanzenbaumaßnahmen gezogen werden [GAF 1999].

Fernerkundungsaufnahmen dienen als Managementinstrument für die landwirtschaftliche Bestandsführung, geben Aufschluss über den Entwicklungszustand des gesamten Schlages und ermöglichen eine schnelle Erfassung der Standortverhältnisse bei Betriebsleiterwechsel oder Neulächenerwerb [PRE AGRO 2001].

Von der Aussaat bis zur Ernte durchläuft eine Pflanze verschiedene Entwicklungsstadien. Dieses führt zu einer Änderung der Reflexion und der Absorption der elektromagnetischen Strahlung, was wiederum Rückschlüsse auf die Entwicklung und die Vitalität ermöglicht [BLASCHKA 2003]. Die unterschiedlichen Entwicklungsstadien der Pflanzenbestände werden durch mehrere Überfliegungen im Jahr erfasst [PRE AGRO 2001].

Mit fortschreitender Seneszenz (lateinisch *senescere* = alt werden, altern) ändert sich das Reflexionsverhalten der Pflanzen [JACOBI 2005]. Mit Beginn der Seneszenz sinkt der Chlorophyllgehalt der Pflanzen, was zu einer verminderten Reflexion im grünen Bereich, einer verminderten Absorption im roten Bereich, sowie zu einer erhöhten Absorption im blauen Bereich führt [KLISCH 2003]. Ein seneszenten Einzelblatt weist im nahen Infrarot (NIR) eine hohe Reflexion auf, ein seneszenten Pflanzenbestand hingegen weist im NIR eine hohe Absorption auf [JACOBI 2005]. Um eine vorzeitige Seneszenz durch Nährstoff- oder Wassermangel rechtzeitig erkennen zu können, sollte in der Zeit der Abreife eine fernerkundliche Aufnahme erfolgen [PRE AGRO 2001].

Die Ausbildung von photosynthetisch aktiven Pigmenten bei Pflanzen wird durch deren Stickstoffversorgung beeinflusst [GAF 1999]. Tritt bei einer Pflanze ein Stickstoffmangel auf, so wird aufgrund von Chlorophyllmangel deren Photosynthese eingeschränkt, was zu einer Zunahme der Reflexion im Rotbereich und aufgrund der zurückgehenden Blattmasse zu einer Senkung der Reflexion im NIR führt [LILIENTHAL 2003]. Der Chlorophyllgehalt lässt sich aus dem Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), der aus Satellitendaten berechnet wird, modellieren und lässt somit Rückschlüsse auf den Zustand der Stickstoffversorgung zu [PATIL et al 2004].

Mit den Methoden der satellitengestützten Fernerkundung lässt sich auch die Bodenfeuchte bestimmen. Hierzu sind sowohl der Mikrowellenbereich der Radarsysteme als auch der Infrarotbereich der optischen Satellitensysteme geeignet. Die Bestimmung der Bodenfeuchte mit Radarsystemen erfolgt im Bereich der langwelligen Mikrowellen [KLENKE 1999]. Mikrowellensysteme können Feuchtigkeitsunterschiede besonders gut zeigen [KONTRADOWITZ 2006], da sie in der Lage sind, in Medien wie Boden oder Vegetation einzudringen und somit über ihr Emissions- oder Reflexionssignal Informationen über den Zustand des Mediums liefern können [KLENKE 1999]. Die Bestimmung der Bodenfeuchte mit operationellen Satelli-

ten erfolgt im Bereich des mittleren Infrarot (MIR), da die Strahlen des MIR bei den Wellenlängen  $\lambda = 1,45 \mu\text{m}$  und  $\lambda = 1,95 \mu\text{m}$  von der Feuchtigkeit im Boden absorbiert werden [KONTRADOWITZ 2006].

Auch die Niederschlagsmenge kann mit Hilfe der Fernerkundung bestimmt werden. Zur Bestimmung von Niederschlagsmengen mit Radarsystemen werden mit einem passiven Mikrowellenradiometer die Partikel von Wasser oder Eis in der Atmosphäre ermittelt [KLENKE 1999]. Auch geostationäre Satelliten können zur Bestimmung der Niederschlagsmenge herangezogen werden. Hier werden mit einem Radiometer die Temperatur und die Reflexion an der Wolkenoberfläche im sichtbaren und infraroten Spektrum gemessen [KLENKE 1999]. Anhand der Kenntnisse über die Bodenfeuchte und die Niederschlagsmenge kann der Landwirt eine gezielte Bewässerung seiner Felder planen und durchführen.

Seit 1995 findet die Fernerkundung auch Anwendung in der Bananenproduktion in Südamerika. Die Bananenplantage stellt ein großes ökologisches System dar, worin viele verschiedene Organismen versuchen, das vorhandene Nährstoffangebot zur Sicherung ihrer eigenen Existenz zu nutzen, was die Qualität und Erntemenge der Bananen stark beeinträchtigt [BANAFAIR 1999]. Bananen sind zum Beispiel sehr anfällig für die Zerstörung durch Pilze und müssen deshalb regelmäßig mit Fungiziden behandelt werden [ANTENUCCI & ANTENUCCI 2002].

Das Ausprühen von Fungiziden erfolgt nach ANTENUCCI & ANTENUCCI [2002] mit Hilfe eines Flugzeuges, welches mit einem DGPS-Empfänger, einer GPS (Global Positioning System) -Antenne und einer Differentialkorrektur-Antenne über dem Cockpit und einer anzeigenden Lichtleiste sowie einem beweglichen Kartendisplay im Cockpit ausgestattet ist. Für jede Fruchtparzelle sind Sprühbegrenzungen und Gefahrenquellen wie Hochspannungsleitungen oder Wasserstellen kartiert und digitalisiert [ANTENUCCI & ANTENUCCI 2002]. Die präzise Flugbahn des Flugzeugs wird durch das GPS garantiert. Wenn sich der Pilot einer zu besprühenden Fläche nähert, ändern die LEDs (Light Emitting Diode) an der Lichtleiste im Cockpit ihre Farben von rot (nicht sprühen) über orange (Sprüfung vorbereiten) bis grün (anfangen zu sprühen) und schließlich wieder zu rot, wenn die Sprüharbeit beendet ist [ANTENUCCI & ANTENUCCI 2002]. Wenn eine Gefahrenquelle in der Nähe ist, wird das

über eine Warnung an der Lichtleiste angezeigt und der Pilot muss seinen Kurs ändern [ANTENUCCI & ANTENUCCI 2002].

Bei der Pflanzenproduktion kann mit Hilfe der Fernerkundung eine Ertragsvorhersage durchgeführt werden. So beschreiben YANG & EVERITT [2002] in einer Studie den Zusammenhang zwischen der Reflexion im grünen, roten und NIR-Bereich und der Höhe des Ertrages, der mit Hilfe von multispektralen Luftbildern festgestellt wurde. Auch eine Ertragsprognose anhand von verschiedenen Vegetationsindizes ist möglich [VOß 2005], [CZISCH & TUTTENUJ 2008].

Die Anwendung der optischen Fernerkundung in der Landwirtschaft erfordert eine sehr hohe räumliche Auflösung. Diese wird aber nur von wenigen Satellitensystemen wie Ikonos-2 oder QuickBird geboten. Diese haben allerdings nur sehr kleine Aufnahme Fenster und beanspruchen für die Nutzung in der Landwirtschaft zu hohe Kosten [VOß 2005]. Ein weiteres Defizit ist die Wetterabhängigkeit der Satelliten, wodurch die notwendigen Daten nur eingeschränkt verfügbar sind [JACOBI 2005], so sind wolkenfreie Satellitenaufnahmen zum Beispiel nur an etwa 30 Tagen im Jahr verfügbar [GAF 1999].

Ein Vorteil ergibt sich hier bei der Verwendung von Radarsystemen. Mikrowellendaten von abbildenden Radarsystemen wie zum Beispiel ERS-1/2 werden nicht von Wolken beeinflusst und sind zudem preiswerter als die Daten von SPOT, Landsat oder IRS-1C/D, allerdings ist die Datenauswertung hier komplizierter als die Auswertung optischer Daten [KLENKE 1999]. Ein Nachteil von ERS-1/2 ist aber die geringe räumliche Auflösung. Inzwischen gibt es aber auch hochauflösende Radarsysteme, wie zum Beispiel TerraSAR-X mit einer räumlichen Auflösung im Meter-Bereich [DLR 2007]. Neben der bereits erwähnten Erfassung von Bodenfeuchte und Niederschlagsmenge, können mit Hilfe der Radarfernerkundung auch die Pflanzenhöhe, die Verteilung der frischen Biomasse und die Bodenrauigkeit erfasst werden [SANDERS 2002].

Die Tabellen 13 und 14 geben eine Übersicht über die mit Hilfe der Fernerkundung untersuchbaren Parameter, die für die Landwirtschaft wichtig sind, mit ihren erforderlichen räumlichen und zeitlichen Auflösungen sowie ihrer geforderten Datenaktualität.

Tabelle 13: Parameter für den Zustand des Pflanzenbestands [Quelle: KATSARAS 2004, verändert]

Parameter	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Aktualität der Daten
Bestandsdichte	5-10 m	monatlich	1 Monat
Erntefortschritt	5-10 m	täglich	5 Stunden
Fruchterkennung	1-3 m	jährlich	1 Woche
Lagergetreideanteil	1-3 m	monatlich	1 Woche
Nährstoffversorgung	10-25 m	monatlich	1 Woche
Pflanzenhöhe	10-25 m	wöchentlich	1 Tag
Reifenzustand	10-25 m	monatlich	1 Tag
Schädlingsbefall	5-10 m	wöchentlich	1 Woche
Verunkrautung	3-5 m	monatlich	1 Woche
Vitalität	10-25 m	monatlich	1 Monat
Witterungsschäden	1 m	monatlich	1 Tag

Tabelle 14: Parameter für den Zustand des Bodens [Quelle: KATSARAS 2004, verändert]

Parameter	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Aktualität der Daten
Bodenfeuchte	5-10 m	täglich	1 Tag
Bodengefüge	3-5 m	jährlich	1 Jahr
Bodentemperatur	3-5 m	täglich	5 Stunden
Bodenart	10-25 m	täglich	5 Stunden
Erosionsvorgänge	1 m	alle 3 Tage	1 Jahr
Oberflächenfeuchte	5-10 m	täglich	1 Tag

### **3.1.3 Precision Farming**

#### **3.1.3.1 Grundlagen, Ziele und Voraussetzungen**

Precision Farming ist ein Verfahren zur Anpassung der Bewirtschaftungsmaßnahmen an kleinräumige Gegebenheiten auf der Anbaufläche [RÖSCH et al. 2006] mit gezielter Berücksichtigung der Ansprüche des Natur- und Umweltschutzes bei der Bewirtschaftung [SCHULZ 2006]. Precision Farming wird auch als Teilflächenwirtschaft bezeichnet, da hier Teilflächen zur einheitlichen Bewirtschaftung abgegrenzt werden [WERNER 2004].

Ziele des Precision Farming sind die Steigerung der Ertragseffizienz, die Verbesserung der Ertragsqualität und der Ertragssicherheit sowie der Schutz der Umwelt [MANIAK 2004]. Hierbei sollen bei gleichbleibendem Ertrag durch effiziente Zeit- und Energienutzung Kosten eingespart werden [VOßHENRICH 2004].

Anwendungsbereiche des Precision Farming sind Bodenbearbeitung, Aussaat, Düngung, Pflanzenschutz, Ernte sowie Dokumentation und Rückverfolgbarkeit von Betriebsabläufen und ackerbaulichen Maßnahmen [WERNER 2004], [RÖSCH et al. 2006].

Maschinen und Geräte sind mit Sensoren versehen, die während der Bearbeitung Daten über die Boden- und Pflanzeigenschaften liefern [MUHR 1997], [WERNER 2004]. Anschließend müssen die Daten automatisch an ein Datenverarbeitungssystem weitergeleitet und dort analysiert und in logische Einheiten eingeteilt werden [STEINBERGER 2006]. Die Datenerfassung erfolgt mit einem Datenerfassungsgerät in ISOBUS (ISO 11783), einer Datenschnittstelle für die Verbindung von Traktor, Anbaugerät und Betriebsmanagement [VDMA 2005]. Hier werden Zeit, Ort (GPS) und Maschinendaten automatisch erfasst, an einen Server übertragen und mit Hilfe der GPS-Position einem Schlag zugeordnet [STEINBERGER 2006]. Somit erhält der Landwirt die Möglichkeit, geeignete Maßnahmen in größerem Umfang und mit einer höheren Genauigkeit durchzuführen [WERNER 2004].

Zur Standortbeschreibung werden Daten herangezogen, die sich nur sehr langsam über eine oder mehrere Vegetationsperioden, Jahrzehnte oder Jahrhunderte ändern [WERNER 2004]. Hierzu gehören Standorteigenschaften wie das Relief (Hangneigung, Hangrichtung), der Boden (Bodenart, Wassergehalt, Humusgehalt, Struktur, Kalkgehalt, pH-Wert, Nährstoffgehalt,

Salzgehalt), die unterirdische Wasserversorgung und das Klima [MANIAK 2004], [WERNER 2004]. Diese Daten können aus Flurkarten, topographischen Karten, Klimakarten oder Luftbildern abgeleitet werden [MANIAK 2004]. Für die Beschreibung von Pflanzenbeständen werden Daten benötigt, die sich kurzfristig ändern [WERNER 2004]. Zur Erfassung der Bestands- und Bodenheterogenität werden optische Sensoren verwendet. Hierzu zählen sowohl Online-Sensoren auf dem Schlepper, als auch Sensoren satelliten- und flugzeuggestützter Fernerkundungssysteme [LILIENTHAL 2003].

Bei der Bodenbearbeitung spielen die Variation der Arbeitstiefe und der Bearbeitungsintensität innerhalb des Feldes eine große Rolle. Die Arbeitstiefe ist abhängig von der Bodenfeuchte, der Bodenart, der Bodenverdichtung und der Menge an Ernterückständen, die in den Boden eingearbeitet werden sollen [RÖSCH et al. 2006]. So ist bei Böden, denen eine Gefahr von Dichtelagerung oder Vernässung droht, die wenig Humus enthalten bzw. Böden, die in Kuppen oder Senken liegen, eine tiefe Bodenbearbeitung notwendig [RÖSCH et al. 2006]. Für die Bestimmung der notwendigen Arbeitstiefe werden über fahrzeuggestützte Messgeräte die Bodentiefe, der Bodenwiderstand und der Wasserhaushalt gemessen.

Bei der Aussaat werden die Variation der Ablagetiefe und der Aussaatstärke berücksichtigt. Ziele der teilflächenspezifischen Aussaat sind nach HÜTER et al. [2005] die Einsparung von Saatgut und die Bestimmung des optimalen Standraumes für jede Pflanze. Hierfür kommen mechanische und pneumatische Sämaschinen zum Einsatz [HÜTER et al. 2005].

Die teilflächenspezifische Variation der Düngung unterteilt sich in die Variation der mineralischen Grunddüngung und der Kalkung, die dazu dienen, den Boden mit Phosphat, Kalium und Magnesium zu versorgen bzw. den Boden auf einen optimalen pH-Wert einzustellen und die Variation der Stickstoffdüngung, die für eine optimale Bestandsentwicklung sorgt [RÖSCH et al. 2006]. Für die Stickstoffdüngung wurden verschiedene fahrzeuggestützte Sensoren entwickelt, die den Versorgungszustand der Pflanzen während der Überfahrt erfassen und das Düngemittel direkt in der benötigten Dosis ausbringen. Sensoren, die für die Stickstoffdüngung eingesetzt werden, sind der N-Sensor von YARA, das Crop-Meter von Agrom und der Mini-Veg N von Fritzmeier. In Tabelle 15 sind die Eigenschaften der genannten Stickstoffsensoren zusammengestellt.



Tabelle 15: Stickstoffsensoren [Quelle: HÜTER et al. 2005]

	N-Sensor	Crop-Meter	Mini-Veg N
Montage	auf Fahrzeugdach	pendelnder Metallstab in Front-hydraulik	Ausleger mit 4 Sensoren
Abstand zur Pflanze	3-10 m	direkter Kontakt	< 3 m
Messprinzip	Chlorophyllkonzentration im Bestand	Biege-widerstand der Halme	Chlorophyllkonzentration im Blatt
Messfeld	2x3 m links und rechts der Fahrspur	1 m innerhalb der Fahrspur	4x1 m links und rechts der Fahrspur
Zielgröße	N-Versorgung, Halmstabilisator, Fungizide	N-Versorgung, Halmstabilisator, Fungizide	N-Versorgung, Halmstabilisator, Fungizide
Kultur	Getreide, Raps, Mais, Kartoffeln	Getreide	Getreide
Preis	22.750 €	13.000 €	20.000 €

Der Pflanzenschutz umfasst Schutzmaßnahmen gegen Unkräuter, Pilze und Insekten durch chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel wie Herbizide, Fungizide und Insektizide. Unkräuter sind nicht homogen sondern als Nester auf dem Acker verteilt und können mit Hilfe der Satelliten- und flugzeuggestützten Fernerkundung oder mit Sensoren am Sprühfahrzeug erkannt werden [RÖSCH et al. 2006]. Pilzbefall kann ebenfalls mit satellitengestützter Fernerkundung erkannt werden. Auch die Pilzerkennung mit Sensoren am Ausbringungsfahrzeug wäre möglich, ist für die Anwendung in der Landwirtschaft allerdings noch zu teuer [RÖSCH et al. 2006]. Die Erkennung von Insekten ist mit Hilfe eines Radarsensors möglich, was aber für teilflächenspezifische Spritzentscheidungen ungeeignet ist, da aufgrund der begrenzten Luftraumüberwachung mit einem stationären Bodenradarsystem nur der Zeitpunkt des Einwanderns der Insekten in das Feld erfasst werden kann [RÖSCH et al. 2006].

Beim Einsatz von fahrzeuggestützten Sensoren kann, ähnlich wie bei der Düngung, die benötigte Menge an Pflanzenschutzmitteln erfasst und dann gezielt ausgebracht werden. Dadurch

kann die Gesamtmenge an Pflanzenschutzmitteln reduziert und somit die Umwelt geschont werden.

Um Precision Farming anwenden und erfolgreich umsetzen zu können, müssen ein paar wesentliche Voraussetzungen erfüllt sein. HUFNAGEL [2004] nennt hierfür die folgenden:

- das Vorhandensein von Boden- und Bestandsunterschieden innerhalb eines Schlages
- die Möglichkeit, Boden- und Bestandsunterschiede (Trocken- und Nassstellen, Relief, Bodenart, Ertrags erwartetung, Unkrautnester, Schädlingsbefall etc.) räumlich abzugrenzen
- die Verfügbarkeit von Daten, die bereits Unterschiede sichtbar machen (Luftbilder, Bodenkarte, Ertragskartierung)
- der Umgang mit PC, Datenverarbeitung, Internet
- Geeignete Technik

DIXON & MCCANN [1997] nennen noch weitere wesentliche Anforderungen des Precision Farming, nämlich:

- verbesserte Mess- und Analysemethoden
- unvoreingenommene, systematische und genaue Beurteilungen (Kosten, Vorteile für Ökonomie und Umwelt)
- neue Forschungsmethoden
- high-speed Datenverbindungen
- Datensammlungen in regionalen Datenbanken (für Forschung, Auswertung, Marketing)
- eine Prüfung öffentlicher Datensammlungen, um den Zugang und die Verwendung der Daten für Precision Farming sicherzustellen

### 3.1.3.2 GPS – Definition, Funktionsweise und Anforderungen

Eine effiziente teilflächenspezifische Bewirtschaftung des Ackers wurde durch den Einsatz des Global Positioning System (GPS) möglich, denn so können punktuell genaue Informationen über jeden einzelnen Schlag gewonnen werden [AGRAVIS 2009]. Das GPS wurde in den 1970ern vom US-Verteidigungsministerium entwickelt. 1977 wurde der erste Satellit gestartet. Das GPS wurde zunächst für militärische Zwecke eingesetzt, ist seit 1993 aber auch für zivile Anwendungen verfügbar.

Das Global Positioning System (GPS) besteht aus dem Raumsegment, dem Kontrollsegment und dem Nutzersegment. Das Raumsegment umfasst 24 Satelliten, die in sechs Bahnen mit je vier Satelliten in ca. 20.200 km Höhe mit einer Inklination von  $55^\circ$  die Erde umkreisen. Die Umlaufzeit der Satelliten beträgt 12 Stunden. Die Satelliten sind mit synchron laufenden Atomuhren versehen und übermitteln Signale über zwei L-Band Frequenzen mit  $L1 = 1.575,42 \text{ MHz}$  ( $\lambda = 19 \text{ cm}$ ) und  $L2 = 1.227,60 \text{ MHz}$  ( $\lambda = 24 \text{ cm}$ ). Anhand der Signale kann der Nutzer die räumliche Satellitenposition und eine Pseudoentfernung zum Satelliten berechnen [KNICKMEYER 2003]. Abbildung 6 zeigt die Konstellation der 24 GPS-Satelliten.

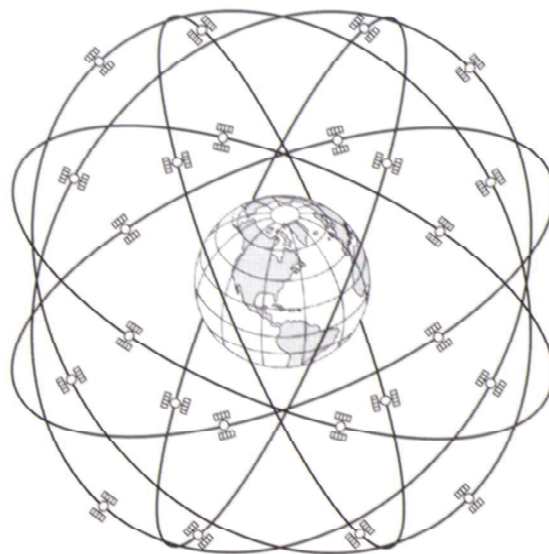


Abbildung 6: Konstellation der 24 GPS-Satelliten (Quelle: RIZOS 2002)

Das Kontrollsegment umfasst mehrere Monitor- und Bodenkontrollstationen. Die Leit- oder Master Control Station befindet sich in Colorado Springs. Vier weitere Monitorstationen befinden sich auf Hawaii, in Kwajalein im Pazifik, in Diego Garcia im Indischen Ozean und auf Ascension Islands im Atlantik [RIZOS 2002]. In der Master Control Station werden Parameter der Flugbahn und der Satellitenuhren berechnet und an die Bodenkontrollstationen übermittelt, von wo aus sie zu den Satelliten übertragen werden [DE LANGE 2002]. Die Aufgaben der anderen vier Monitorstationen sind die Satellitenbeobachtung und Bahnberechnung sowie die Datenübertragung [DE LANGE 2002]. Das Nutzersegment besteht aus den GPS-Empfängern, die den genauen Standpunkt auf der Erde aus Signalen bestimmen [DE LANGE 2002].

Im Satelliten werden synchron zur Frequenz der Satellitenatomuhren Pseudozufallscode erzeugt. Kann ein Empfänger denselben Code erzeugen, so kann die Laufzeit durch den Vergleich des Empfängercodes mit dem empfangenen Code berechnet werden [KNICKMEYER 2003]. Durch die Multiplikation der Laufzeit mit der Lichtgeschwindigkeit kann die räumliche Entfernung zwischen Satellit und Empfänger bestimmt werden [KLOEPFER 2004].

Aus der Messung der Entfernungen zu drei Satelliten kann durch Trilateration (Entfernungsmessung von drei Punkten aus) die aktuelle zweidimensionale Position bestimmt werden, durch die Entfernungsmessung zu vier Satelliten kann die aktuelle dreidimensionale Position bestimmt werden [THURSON et al. 2003].

Der vierte Satellit dient hierbei der Synchronisation der Uhren an Bord des Empfängers [KLOEPFER 2004], welcher aus Kostengründen nur mit Quarzuhren ausgestattet ist, die im Vergleich zu den Atomuhren der Satelliten ungenau gehen, und somit neben der Genauigkeit der Laufzeit auch die Genauigkeit der Positionsbestimmung verfälschen. Um beispielsweise bei der Positionsbestimmung eine Genauigkeit von  $\pm 10$  m zu erreichen, müsste die Laufzeit bis auf 3 Nanosekunden (nsec) genau sein [KLOEPFER 2004].

Die Genauigkeit der Positionierung kann durch den Einsatz eines differentiellen GPS (DGPS) noch gesteigert werden, indem die Eigenposition eines stationären Referenzempfängers ermittelt wird [KLOEPFER 2004], der dann Korrektursignale ausstrahlt, die von mobilen GPS-

Empfängern, zum Beispiel auf landwirtschaftlichen Arbeitsmaschinen, empfangen und ausgewertet werden können.

Die Landesvermessungsämter der Bundesrepublik Deutschland bieten den Positionierungsdienst SAPOS an, der Korrektursignale, mit denen die Genauigkeit bis in den mm-Bereich hineinreicht, bereitstellt [DE LANGE 2002], [KLOEPFER 2004]. Hierzu gehören nach DE LANGE [2002] und KLOEPFER [2004]:

- ein Echtzeit Positionierungsservice (EPS) mit einer Genauigkeit von 0,5 bis 2 m
- ein Hochpräziser Echtzeit Positionierungsservice (HEPS) mit einer Genauigkeit von 1 bis 2 cm
- ein Geodätischer Präziser Positionierungsservice (GPPS) mit einer Genauigkeit von 1 cm
- ein Geodätischer Hochpräziser Positionierungsservice (GHPS) mit einer Genauigkeit im mm-Bereich

Zu den Anforderungen, die ein GPS-System erfüllen muss, gehört laut KNICKMEYER [2003] die weltweite, dreidimensionale Echtzeit-Positionsbestimmung in einem einheitlichen Bezugssystem zu jedem beliebigen Zeitpunkt. Damit die hochgenaue Echtzeitpositionierung und die Navigation für alle Nutzer möglich werden, muss ein GPS-System vielen Nutzern gleichzeitig zugänglich sein, und einem Nutzer müssen mehrere Signale gleichzeitig zur Verfügung stehen [RIZOS 2002].

Das GPS wird zur Erfassung von Bodeneigenschaften (Temperatur, Feuchtigkeit, pH-Wert, organische Zusammensetzung, Nährstoffe, Durchlässigkeit), für Klimazwecke (Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Sonnenstrahlung, relative Feuchtigkeit, Regen, Schneetiefe, Schneedichte, Eisbildung) und Wasseranalysen (Temperatur, Turbulenz, Sauerstoffbedarf, pH-Wert, Tiefe, Nährstoffe) eingesetzt [THURSON et al. 2003].

In der Landwirtschaft dient das GPS-Signal der Positionsbestimmung von Maschinen und Geräten auf dem Feld, trägt somit zur Erfassung von Boden- und Bestandsunterschieden bei und unterstützt den Landwirt bei der Maßnahmendurchführung [KLOEPFER 2004]. Auch können

mittels GPS schutzbedürftige Flächen, die nicht mit Dünger oder Pflanzenschutzmitteln behandelt werden dürfen, hervorgehoben werden, indem an den Schlepperfahrer ein Signal gegeben wird, sobald er eine solche Fläche befährt [EHLERT & WAGNER 1997].

Anforderungen, die von einem GPS-System in der Landwirtschaft erfüllt werden müssen, werden von KLOEPFER [2004] wie folgt genannt:

- Robustheit gegenüber Erschütterungen, Temperaturschwankungen, Staub, Chemikalien und Feuchtigkeit
- hohe Empfangsqualität
- häufige Wiederholbarkeit der Messungen
- Überbrückung von Signalausfällen
- Schnittstellen zum Bordcomputer

Genauigkeitsanforderungen an GPS-Systeme in der Landwirtschaft ergeben sich nach MANIAK [2004] „im Wesentlichen aus der räumlichen Variabilität der Felder, der Genauigkeit der Positionierung während der Applikation ..., der Arbeitsbreite der Maschine und der Reaktionszeit der Landmaschine...“

Die Grundgenauigkeit des GPS liegt bei 5 bis 7 m, was für Felderkennung und Ertragskartierung vollkommen ausreichend ist [HÜTER et al. 2005]. Diese Genauigkeit kann, wie bereits beschrieben, mit Hilfe von DGPS-Empfängern erhöht werden. Je höher die zu erreichende Genauigkeit eines Empfängers ist, desto höher ist allerdings auch sein Preis.

DGPS-Empfänger mit einer Genauigkeit von 1 bis 3 m kosten zwischen 1.000 und 3.000 €, das Referenzsignal kostet zwischen 0 und 500 €/Jahr. Zweifrequenz-DGPS-Empfänger mit einer Genauigkeit von 0,1 bis 0,5 m kosten zwischen 5.000 und 10.000 €, ihr Referenzsignal kostet zwischen 1.000 und 2.000 €/Jahr. RTK-DGPS-Empfänger mit einer Genauigkeit von 0,02 bis 0,05 m kosten zwischen 20.000 und 40.000 €, ein Referenzsignal ist hier nicht notwendig, da RTK-DGPS eine eigene Referenzstation hat [HÜTER et al. 2005].

Es gibt verschiedene Steuerhilfen für Landmaschinen. Diese können je nach verwendetem DGPS-Empfänger Genauigkeiten zwischen 2 und 30 cm erreichen. [VAN DER SCHANS et

al. 2008] beschreiben drei verschiedene Steuerhilfen: einfache, automatische und integrierte automatische Steuerhilfen. Einfache Steuerhilfen haben einen Lichtbalken oder einen Monitor mit Richtungsanzeiger und kosten zwischen 1.700 und 3.500 €. Ihre Genauigkeit ist abhängig vom verwendeten DGPS-Korrektursignal und liegt zwischen 10 und 30 cm. Eine höhere Genauigkeit ist hier nach VAN DER SCHANS et al. [2008] nicht möglich, da der Landwirt die Maschine selber steuern muss. Automatische Steuerhilfen, die direkt über das Lenkrad angesteuert werden, können automatisch nach links und rechts steuern, um das Fahrzeug in der Spur zu halten. Die Kosten liegen hier zwischen 6.000 und 14.000 €. Die Genauigkeit ist ebenfalls vom verwendeten DGPS-Signal abhängig und liegt zwischen einigen wenigen cm (RTK-DGPS) und 20 cm (einfaches DGPS). Integrierte automatische Steuersysteme halten das Fahrzeug über eine Steuerhydraulik automatisch in parallelen Bahnen und haben einen Preis von 15.000 bis 40.000 €.

Bei der Verwendung von GPS-Geräten auf landwirtschaftlichen Fahrzeugen muss darauf geachtet werden, dass das GPS-Gerät den höchsten Punkt des Fahrzeugs bildet, so dass eine freie Sicht zum Himmel gewährleistet ist [GEBBERS & LÜCK 2004]. Das GPS-Gerät muss ununterbrochen Koordinaten liefern, was bei der Kartierung großer Schläge in Fahrgassen noch wichtiger ist als die Genauigkeit [GEBBERS & LÜCK 2004]. Bei einem Fahrgassenabstand von 24 m liegt die Genauigkeit bei 5 bis 7 m, so dass hier ein einfacher DGPS-Empfänger zur Genauigkeitsverbesserung ausreichend ist [GEBBERS & LÜCK 2004]. Hochauflösende DGPS-Empfänger sind nur bei hochauflösenden Kartierungen mit einem Fahrgassenabstand von wenigen Metern notwendig [GEBBERS & LÜCK 2004]. Abbildung 7 zeigt das Zusammenspiel von GPS, DGPS und dem landwirtschaftlichen Fahrzeug.

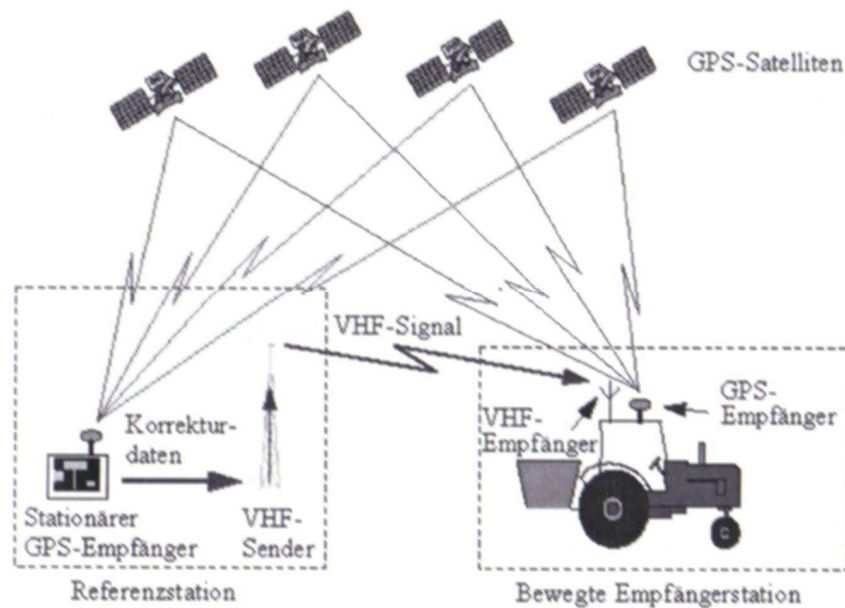


Abbildung 7: Zusammenspiel von GPS, DGPS und dem landwirtschaftlichen Fahrzeug [Quelle MANIAK 2004]

### 3.1.3.3 Fernerkundung innerhalb von Precision Farming

Die Ableitung teilflächenspezifischer Maßnahmen kann, zusätzlich zum GPS-System, durch Fernerkundung unterstützt werden. Für die Analyse und Planung kommen digitale Echtfarben-Luftbilder, digitale Infrarot-Luftbilder und Multispektralaufnahmen zum Einsatz, die hauptsächlich mit flugzeuggestützten Fernerkundungssensoren aufgenommen werden [GRENZDÖRFFER 2004].

Digitale Echtfarben-Luftbilder ermöglichen die Ableitung von Informationen auf drei Ebenen: Die Managementebene gibt einen Gesamtüberblick über den Betrieb und ermöglicht die Unterscheidung von Boden- und Bestandsheterogenitäten innerhalb von Schlägen, die Applikationsebene dient der Erstellung von Maßnahmenkarten (Düngung, Fungizidausbringung) und die dritte Ebene, die strategische Ebene, dient der Bildung von Managementzonen [GRENZDÖRFFER 2004]. In Tabelle 16 werden die Anforderungskriterien an digitale Echtfarben-Luftbilder zusammengestellt.



Tabelle 16: Anforderungskriterien an digitale Echtfarbenluftbilder (Quelle: nach GRENZDÖRFFER 2004]

Kosten pro ha	Bildflug: 1,50–2 €, Biomasseindexberechnung: 0,30 €, Schlagvermessung: 0,30 €	
Verfügbarkeit	für jeden Schlag neu zu erstellen durch regionalen Dienstleister	
Fruchtarten	unabhängig	
Flächenleistung	500 bis 1.000 ha/Flugtag	
Auswertungszeit	eine Woche nach Befliegung	
Erhebungszeitraum	Getreide:	EC 30-37* <sup>1</sup> (Bestandsdifferenzierung) bzw. EC 75-85* <sup>2</sup> (Ertragsdifferenzierung)
	Mais:	bis Reihenschluss (Bestandsdifferenzierung) bzw. Abreifephase (Ertragsdifferenzierung)
	Boden:	Frühjahr vor Bestellung
Räumliche Aufl.	Bodenauflösung: 0,5-0,7 m/Pixel, Lagegenauigkeit: 1 Pixel, Biomasseindex: 5 m	
Zeitliche Stabilität	Momentaufnahmen von Boden und Bestand, Mehrfachaufnahmen erlauben Abgrenzung von Zonen unterschiedlicher Bestands- und Ertragsentwicklung	
Datenauswertung	schlagweise, mit Hilfe vorhandener Schlaggrenzen oder Digitalisierung auf Luftbild hochgenaue Georeferenzierung, Berechnung des Biomasseindex	
Risiken	Befliegung ist wetterabhängig, Aussagefähigkeit der Aufnahmen ist phänologieabhängig, Verhinderung geeigneter Aussagen durch Unkraut, Schatten an Schlagrändern	

-----  
\*<sup>1</sup> EC 30-37: EC 30 = Schossbeginn, EC 31 = 1-Knoten-Stadium, EC 32 = 2-Knoten-Stadium, EC 37 = Erscheinen des letzten Blattes

\*<sup>2</sup> EC 75-85: EC 75 = Milchreife. EC 85 = Teigreife

Digitale Infrarotaufnahmen sind nach DOHMEN [2004] effektiv und kostengünstig für eine erste Heterogenitätsbeurteilung. Weiterhin dienen sie der Erhebung von Bodenbeprobungspunkten und geben Aufschluss über Krankheitsbefall, Trockenheit und das Ertragspotential [DOHMEN 2004]. Tabelle 17 gibt einen Überblick über die Anforderungen an digitale Infrarotaufnahmen.

Tabelle 17: Anforderungskriterien an digitale Infrarotaufnahmen [Quelle: nach DOHMEN 2004]

Kosten pro ha	0,50 € (bei multitemporalen Aufnahmen und 10-jähriger Nutzungsdauer)	
Verfügbarkeit	für jede Fläche neu zu erstellen durch Dienstleister	
Fruchtarten	Getreide, Zuckerrüben, Erbsen	
Flächenleistung	50.000 ha/Tag	
Auswertungszeit	15 Minuten pro Schlag und Einzelbild	
Erhebungszeitraum	Frühjahr:	Aufschluss über Bestandsunterschiede durch Auswinterung oder Faktoren wie Temperatur, Feuchtigkeit, Nährstoffgehalt
	Vorm Ährenschieben:	Aufschluss über Unterschiede in der Bestandsdichte
	Beginn der Abreife:	Aufschluss über vorzeitige Abreife durch Wasser- oder Nährstoffmangel oder Krankheit
Räumliche Auflösung	1-4 m/Pixel (abhängig von Flughöhe und Kameraauflösung)	
Zeitliche Stabilität	relativ eng vorgegebenes Zeitfenster	
Datenauswertung	Klassifikation mit Hilfe von Spektralanalyse- und GIS-Software	
Risiken	keine Ableitung der absoluten Biomasse möglich	

Multispektralaufnahmen geben über Boden-Pflanzen-Spektralmodelle Aufschluss über die Anpassung der Pflanzen an die Wasserbilanz und ermöglichen die Erfassung des Pflanzenzustands während der verschiedenen Wachstumsphasen [SELIGE 2004]. In Tabelle 18 sind die Anforderungen an Multispektralaufnahmen zusammengestellt.

Tabelle 18: Anforderungskriterien an Multispektralaufnahmen (Quelle [SELIGE 2004])

Kosten pro ha	20 – 100 €, abhängig von Flächenumfang, räumlicher Auflösung, Sensor und Plattform
Verfügbarkeit	über Dienstleister verfügbar
Fruchtarten	Zuckerrüben, Wintergerste, Winterweizen, Körnermais, zum Teil auch Winterroggen, Sommergetreide, Sonnenblumen, wenig geeignet für Raps, Erbsen, Ackerbohnen, nicht für unter Bewässerung stehender Pflanzen oder bei Kartoffel- und Gemüseanbau
Flächenleistung	bis ca. 500.000 ha/Befliegungstag möglich
Auswertungszeit	abhängig von Sensortechnik, Datenumfang, Anzahl der Fruchtarten, und Kalibrierungsaufwand für Boden-Pflanzen-Spektralmodell
Erhebungszeitraum	zwischen Mitte Mai und Ende August, selten auch im September
Räumliche Auflösung	3 bis 10 m
Zeitliche Stabilität	unbefristet nutzbar, außer bei Bodenerosion/ Bodenverdichtung
Datenauswertung	von Dienstleistern durchgeführt, da Spezialkenntnisse erforderlich
Risiken	Befliegung ist wetterabhängig, Präzision der Aussagegenauigkeit ist abhängig von negativer Wasserbilanz

Auch die Verwendung der satellitengestützten Fernerkundung im Precision Farming ist möglich. Die Verwendung von passiven Fernerkundungssensoren dient der Analyse der Pigmentzusammensetzung und -konzentration und der Bestimmung von Turgeszenz (= Fähigkeit, Wasser und Nährstoffe aufzunehmen), Zellstruktur, Seneszenz, Phänologie (= Lehre von den periodisch wiederkehrenden Wachstums- und Entwicklungserscheinungen von Pflanzen), Bodenfarbe und Bodenfeuchtigkeit [SANDERS 2002]. Aktive Fernerkundungssensoren dienen ebenfalls der Bestimmung von Phänologie und Bodenfeuchtigkeit sowie zur Darstellung der Wuchshöhe, der Verteilung der frischen Biomasse und der Bodenrauhigkeit [SANDERS 2002].

Bei der optischen satellitengestützten Fernerkundung wird die Sicht oft durch Wolken behindert, so dass während der Bestandsbeobachtungen, die nur während der Hauptwachstumsphase von Mitte März bis Juli durchgeführt werden können, selten Bilder mit guter Qualität verfügbar sind [LILIENTHAL 2003]. Hier ist die Anwendung der flugzeuggestützten Fernerkundung von Vorteil, da Flugzeuge unter den Wolken geflogen werden können.

Ein weiteres Defizit bei Satelliten als auch bei Flugzeugen stellt der Zeitverzug dar, mit dem die aufbereiteten Daten dem Landwirt zur Nutzung zur Verfügung stehen. [LILIENTHAL 2003] nennt hier beispielsweise einen Zeitverzug von 14 Tagen bei der Rohdatenverarbeitung (Auslesen der Daten, Korrektur systematischer Fehler). Bei zusätzlicher Geocodierung oder der Korrektur des Atmosphäreneinflusses kann der Zeitverzug von der Aufnahme bis zur Verfügbarkeit beim Landwirt sogar 6 Wochen betragen [GRENZDÖRFFER 1998]. Ein weiterer Zeitverzug ist durch die Georeferenzierung der Bilddaten gegeben.

Um den Einfluss der Bewölkung zu eliminieren und die Datenverfügbarkeit zu beschleunigen, wurde von SCHNUG et al. [2000] das LASSIE (Low Altitude Stationary Surveillance Instrumental Equipment)-Konzept, ein bodengestütztes Fernerkundungssystem, entwickelt. Das System ist mit einer herkömmlichen Kamera, die im sichtbaren Wellenlängenbereich arbeitet und einer Infrarot-Kamera ausgestattet [LILIENTHAL & SCHNUG 2003]. Durch die Aufnahmen im Infrarotbereich sind Aussagen über die Vitalität der Pflanzenbestände möglich.

Das LASSIE-System besteht insgesamt aus vier Komponenten. Neben den bereits erwähnten Kameras verfügt das System noch über eine Positionierungseinheit mit Schwenk- und Neigekopf zur Sensorausrichtung und Variation der Lage im Raum, eine Datenerfassungseinheit zur Digitalisierung der Daten und zum Transport der Daten und eine Archiv- und Auswerteeinheit zur Archivierung der Rohdaten für die anschließende Bearbeitung und Auswertung [LILIENTHAL 2003].

LASSIE hat eine räumliche Auflösung von 0,5 m, die die Beobachtung kleinräumiger Phänomene wie Lagerschäden oder Verunkrautung erlaubt [LILIENTHAL 2003]. Ein Nachteil von LASSIE ist die Beeinträchtigung der Sicht durch Bäume, Gebäude oder eine starke Ausprägung des Reliefs.

Die Gesamtkosten für LASSIE, die sich aus den Kosten für den Sensor, die Steuerelektronik, die Infrastruktur (Mast, Schutzausrüstung, Verwaltung, Fortbildung) und die Auswertungs- und Prozessierungssoftware zusammensetzen, betragen in etwa 18.000 € [LILIENTHAL 2003].

Ein weiteres im Precision Farming angewendetes hochauflösendes System ist das portable Spektrometersystem HandySpec Field [TEC5 2007]. Dieses dient der Erfassung spektraler Daten von Böden und Pflanzen. Laut [TEC5 2007] sind Messungen selbst unter schwierigsten Umgebungsbedingungen möglich, da das System aufgrund einer internen Referenzierung des Umgebungslichts unabhängig von atmosphärischen Einflüssen ist.

In der Landwirtschaft können mit Hilfe des HandySpec Field Aussagen über Stickstoffbedarf, Reifegrad, Wassergehalt und Vegetationszustand unterschiedlicher Pflanzenkulturen sowie über den Blattflächenindex und die Biomasse getroffen werden [TEC5 2007]. In der Fernerkundung können die mit dem HandySpec Field gemessenen Spektraldaten mit Satellitendaten verglichen werden.

Das HandySpec Field misst in den Spektralbereichen von 0,4  $\mu\text{m}$  (blau) bis 1,1  $\mu\text{m}$  (NIR) und ist in zwei unterschiedlichen Ausführungen zu haben [TEC5 2007]. Es gibt zum einen die klassische Version, welche über der Schulter getragen wird und über eine, mittels Lichtwellenleiter mit dem Gerät verbundene, Handmesssonde mit Messauslöseknopf verfügt und zum anderen das CT-Model, welches vor dem Bauch getragen wird, über einen fest mit dem Gerät verbundenen Messknopf verfügt und auch ohne die Verwendung eines Stativs Messungen von hoch gewachsenen Pflanzenkulturen ermöglicht [TEC5 2007]. Weiterhin existiert das HandySpec Field laut TEC5 [2007] auch als Rucksack-Variante für einen erweiterten VIS/NIR-Bereich von 0,4-1,69  $\mu\text{m}$  (bzw. 2,15  $\mu\text{m}$ ).

## 3.2 Tierhaltung

### 3.2.1 Viehwirtschaft

Nach der BSE-Krise im Jahr 1996 hat der Ministerrat der EU (Europäische Union) die EG (Europäische Gemeinschaft) – Verordnung Nr. 820/97 beschlossen. Nach dieser Verordnung muss jedes Rind mit zwei identischen Ohrmarken gekennzeichnet werden, einen Pass erhalten, welcher lebenslang beim Tier verbleibt, im Bestandsregister des jeweiligen Betriebes geführt werden und an die für das Land zuständige Datenbank gemeldet werden [HINCK 2001]. Ziel dieser Maßnahmen ist die detaillierte Rückverfolgbarkeit des Lebens des Rindes, was besonders im Seuchenfall, bei BSE und für den Herkunftsnachweis an der Ladentheke von großer Wichtigkeit ist [HINCK 2001]. Die Kennzeichnung von Tieren zur Rückverfolgung wird ebenfalls in der Schweine- und Geflügelhaltung praktiziert.

Der Verbraucher erwartet aber nicht nur einen Nachweis über die Herkunft der tierischen Erzeugnisse, sondern auch eine artgerechte und umweltschonende Haltung der Tiere. Im Jahr 2000 ist die EG-Verordnung 1804/1999 in Kraft getreten. Diese beinhaltet Regelungen einer ökologischen Tierhaltung als Bestandteil einer ökologischen Landwirtschaft [ULLRICH et al. 2006]. So ist zum Beispiel die Anzahl der Tiere pro Fläche so zu begrenzen, dass die Belastungen der Umwelt minimal sind. Die Unterbringung muss artgerecht, entsprechend der biologischen und ethologischen Bedürfnisse erfolgen [ULLRICH et al. 2006]. So dürfen nach ULLRICH et al. [2006] keine Haltungssysteme mit Vollspaltenboden verwendet werden, und mindestens die Hälfte der Stallfläche muss eine feste Bodenoberfläche haben. Auch müssen für alle Tiere Ruhebereiche mit ausreichend trockener Einstreu und ein ungehinderter Zugang zu Futterstellen und Tränken sowie zur Weide oder zum Auslauf gewährleistet [ULLRICH et al. 2006] und eine Verwendung gentechnisch veränderter Tiere, Pflanzen, Futtermittel oder Mikroorganismen ausgeschlossen werden [BMELV 2006]. Die ökologische Tierhaltung verlangt außerdem, dass alle Tiere, die zugekauft werden, von ökologisch wirtschaftenden Betrieben stammen und dass die Fütterung nur mit ökologisch erzeugten Futtermitteln erfolgen darf [ULLRICH et al. 2006]. Der Zukauf von konventionell erzeugtem Futter darf nicht mehr als 20 % des Gesamtfutterbedarfs betragen [BMELV 2006]. Auf diese Weise können klimaschädigende Emissionen zumindest teilweise reduziert werden.

Um eine artgerechte Tierhaltung zu gewährleisten, die Herkunft und Qualität tierischer Erzeugnisse zu dokumentieren und den Landwirt bei seiner Arbeit zu unterstützen, kommen in der Tierhaltung zunehmend Informationstechnologien zum Einsatz.

### **3.2.1.1 Precision Livestock Farming**

Elektronik in der Tierhaltung unterstützt den Landwirt in seinen Überwachungsaufgaben durch die Erfassung von Parametern der Futteraufnahme, des Tierverhaltens und der Tiergesundheit [SPRENG & AUERNHAMMER 2005]. Die Anwendung von Prinzipien und Techniken der Verfahrenstechnik in der Viehwirtschaft zur Überwachung und Modellierung der Tierproduktion nennt man Precision Livestock Farming [WATHES 2007].

Beim Precision Livestock Farming kommen Sensorik, Robotik und Informationstechnologie zum Einsatz und ermöglichen laut SPRENG & AUERNHAMMER [2005] eine weitgehende Automatisierung von Arbeitsprozessen und Informationsverarbeitung, was wiederum eine ökonomische und ökologische Optimierung der Produktionsprozesse nach sich zieht und somit der Entlastung des Landwirts bei seiner Arbeit, der Verbesserung der Arbeitsergebnisse und der Minderung von Kosten beim Betriebsmitteleinsatz dient [BERGFELD 2006].

Precision Livestock Farming ist Teil der Präzisionslandwirtschaft (Precision Agriculture) und untergliedert sich in Precision Dairy Farming (Präzise Milchviehhaltung), Precision Pig Farming (Präzise Schweinehaltung) und Precision Poultry Farming (Präzise Geflügelhaltung).

Zu den Zielen des Precision Livestock Farming zählen JUNGBLUTH et al. [2005] den Verbraucherschutz durch einen lückenlosen Herkunftsnachweis landwirtschaftlicher Nutztiere, den Umweltschutz durch individuelle und bedarfsgerechte Fütterung zur Reduktion von Emissionen und den Tierschutz durch eine frühzeitige Krankheitserkennung.

Die im Precision Livestock Farming angewandten Technologien müssen übersichtlich und einfach zu bedienen sein, möglichst mit hohem Automatisierungsgrad. Weiterhin sollte die Möglichkeit der Weiterentwicklung gegeben sein [BERGFELD 2006].

Bei hohen Tierbeständen wird mit Hilfe von Sensoren und Datenbanksystemen eine effiziente Einzeltierbeobachtung möglich. Die Auswertung der Daten erfolgt elektronisch mit dem PC oder Handheld (PDA) und dient der Entscheidungsfindung und Durchführung von Aktionen und Behandlungen [PACHE 2007]. Die eingesetzten Sensoren können visueller, opto-elektronischer, elektromagnetischer oder biologischer Art sein. Tabelle 19 gibt einen Überblick über einige dieser Sensoren.

Tabelle 19: Sensoren im Precision Livestock Farming [Quelle: BERGFELD 2006, verändert]

Sensorart	Beispiele	Merkmale
Visuell	Ohrmarke, Tätowierung, Fesselbrand, Ohrkerbung, Halsbrand, Schenkelbrand	nicht automatisch lesbar, am Tier erkennbar
opto-elektronisch	Barcode, Kamera	automatisierbar, stör anfällig, technisch aufwendig, am Tier erkennbar
elektro-magnetische Transponder	Halsbrand, Ohrmarke, Injektat, Bolus	Automatisierbar, hohe Erkennungssicherheit, am Tier erkennbar
Biologisch	immunologische Ohrmarke, Netzhaut- oder Irisscann, DNA-Typisierung	hohe Erkennungssicherheit, nicht am Tier erkennbar

### Precision Dairy Farming

In der Milchviehhaltung kommen zur elektronischen Tieridentifikation Ohrmarken, Injektate, und Boli als Sensoren zum Einsatz. Zu den zu erfassenden Parametern gehören Menge, Temperatur und Inhaltsstoffe der Milch, Körpertemperatur, Gewicht und Maße der Tiere, Aktivität und Verhalten, Diagnosen und Behandlungen sowie Parameter zum Stallklima [BERGFELD 2006]. Die Körpertemperatur wird mit Hilfe von Ohrmarken gemessen oder über die Temperatur der Milch bestimmt [RATSCHOW 2004]. Zur Aktivitätsbestimmung kommen Pedometer (Schrittzähler) zum Einsatz, das Gewicht wird über eine Waage bestimmt [RATSCHOW 2004].



Durch die Messung des Körpergewichtes kann der Landwirt feststellen, ob eine Kuh über- oder unterversorgt ist und somit die Futterzufuhr individuell regeln. Die Erfassung der Aktivität und des Verhaltens eines Tieres gibt Aufschluss über Liegezeiten, Brunst oder Krankheit [RATSCHOW 2004]. Milchabgabemessungen können nach RATSCHOW [2004] nicht nur zur Bestimmung von Menge und Qualität hilfreich sein, sondern auch Hinweise zur Eutergesundheit geben und somit den Landwirt frühzeitig auf Erkrankungen hinweisen.

Precision Dairy Farming besitzt ein hohes Maß an Transparenz bei der Milcherzeugung [SPILKE et al 2003], trägt zur Effizienzsteigerung und zur Gesunderhaltung der Kühe bei [PACHE 2007] und ermöglicht eine einzeltierbezogene Rückverfolgbarkeit aller Behandlungsmaßnahmen, Ereignisse und Vorfälle [SPILKE et al 2003].

#### Precision Pig Farming

In der Schweinehaltung ist die Erfassung von Daten zu Körpertemperatur, Herzfrequenz, Blutdruck etc. nach SCHÖN [2008] äußerst schwierig, so dass der Gesundheitszustand der Tiere über Lautanalysen erfasst werden muss, indem anhand der Dauer und der Frequenz von Schweineschreien die Stressbelastung ermittelt wird. So sind zum Beispiel lang anhaltende, hochfrequente Schreie ein Anzeichen für eine hohe Stressbelastung. Zur eindeutigen Erkennung von Stressschreien und zur automatischen Registrierung von Dauer und Zeitpunkt der Schreie wurde eine Stressschrei-Monitor- und Dokumentationseinheit STREMODO entwickelt [SCHÖN 2008]. STREMODO kann laut SCHÖN [2008] ebenfalls für die Überwachung von Fütterungsanlagen und der Stalltemperatur eingesetzt werden.

Schweine sind besonders anfällig gegen hohe Temperaturen, da ihr Körper diese aufgrund der fehlenden Eigenschaft zu schwitzen, nicht regulieren kann. Deshalb wird die Menge der Futterzufuhr für die Schweine von der Außentemperatur abhängig gemacht. So werden nach RATSCHOW [2003] bei einer Außentemperatur über 26° C automatisch 10 % vom Futter abgezogen und bei einer Außentemperatur über 28° C und einer relativen Luftfeuchte unter 80 % wird zusätzlich eine Verdunstungskühlung eingesetzt, um so den Herztod bei Schweinen aufgrund der zu hohen Temperaturen zu verhindern.

### Precision Poultry Farming

In einer Studie beschreiben FRÖHLICH et al. [2007] die Erkennung von Heim- und Nutztieren mit Hilfe von passiven Transpondern nach ISO 11784 (Radio frequency identification of animals, code structure) und ISO 11785 (Radio frequency identification of animals, technical concept). Hierfür werden Transponder mit niedrigen Übertragungsfrequenzen (low frequency LF, 134,2 kHz) mit Halbduplexübertragungsverfahren verwendet, da sie nach FRÖHLICH et al. [2007] eine hohe Reichweite haben und gegenüber Störeinflüssen nicht so anfällig sind wie Fullduplexsysteme, obwohl diese billiger wären.

Die Transponder dienen der Erfassung der Legeleistung sowie dem Lege- und Auslaufverhalten von Legehennen. Mit Hilfe von elektronischen Schlupflöchern, die die Bewegung von Einzeltieren erfassen können, kann der Aufenthaltsbereich von Hennen im Durchgang zwischen Stall und Kaltscharrraum mit einer Identifikationsrate von 96,5 % bestimmt werden [FRÖHLICH et al. 2007].

Weiterhin beschreiben FRÖHLICH et al. [2007] die Erfassung der Eiablage über die Installation von Nestboxen, die mit einer Antenne am Boden ausgestattet sind. Durch eine mechanische Vorkehrung wird dafür gesorgt, dass immer nur eine Henne das Nest betreten kann. Die Anwesenheit im Nest wird durch einen Fußring, der mit dem Transponder versehen ist, angezeigt [FRÖHLICH et al. 2007]. Die Eiablage wird durch einen Sensor (Ei-Wippe) erfasst und kann laut FRÖHLICH et al. [2007] mit einer Genauigkeit von 96 % der entsprechenden Henne zugeordnet werden.

Zur Erfassung der Tierbewegung haben FRÖHLICH et al. [2007] ein Identifikationssystem mit Vierkanalleseeinheit entwickelt [vgl. Abb. 9], dessen Zeit für einen Lesezyklus unter 100 ms liegt. Über einen PC und ein BUS-System können mehrere Leseeinheiten gekoppelt werden. Ein Befehl vom PC an das BUS-System, das für das Auslesen von Informationen notwendig ist, braucht ca. 5 ms, die Antwortzeit der Transponder auf eine daraufhin vom Steuermodul veranlasste Energieübertragung liegt bei 20 ms [FRÖHLICH et al. 2007].

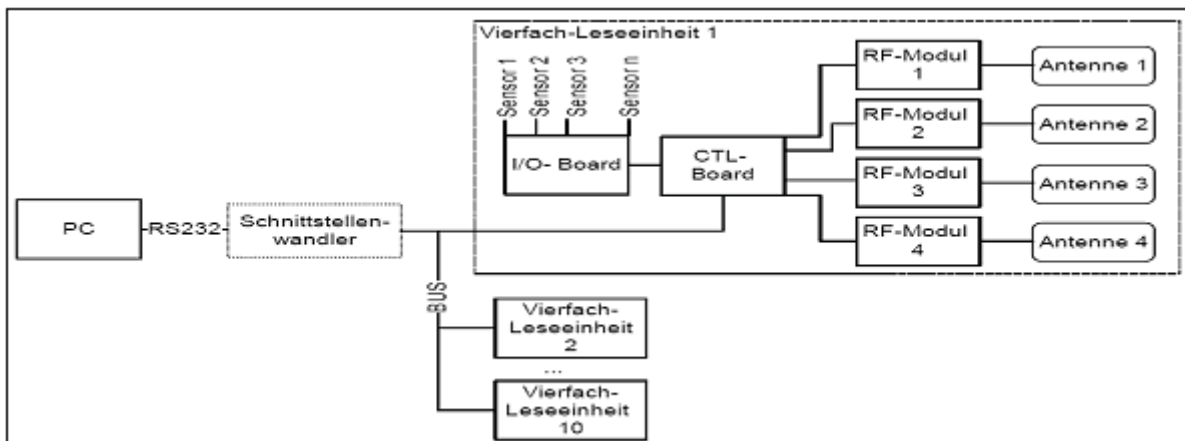


Abbildung 8: Vierkanalleseeinheit [Quelle: FRÖHLICH et al. 2007]

Ein Nachteil dieses Erfassungssystems ist, dass immer nur ein Tier ins Nest oder in den Durchgang darf, was gegen eine artgerechte Tierhaltung spricht. Ein weiteres Problem ist das Fehlen eines Antikollisionssystems für den Fall, dass mehrere Transponder gleichzeitig im Lesebereich einer Antenne positioniert sind [FRÖHLICH et al. 2007].

### 3.2.1.2 Fernerkundung in der Tierhaltung

Die Fernerkundung von Tieren ermöglicht eine Verbesserung der Tierproduktion, weil auf diese Weise auch Daten aufgezeichnet werden können, die sonst nur unter großem Aufwand erfassbar sind, wie es zum Beispiel bei der Tierinventur oder der bereits erwähnten Datenerfassung bei Schweinen der Fall ist.

Für die Anwendung der Fernerkundung in der Tierhaltung haben HURNIK et al. [1995] ein thermographisches Aufnahmesystem entwickelt. Abbildung 9 zeigt ein solches Aufnahmesystem, wie es in einem Schweinestall verwendet wird. Es besteht aus einer Kamera, die oberhalb des Stalles angebracht wird und die Tiere von oben aufzeichnet (1), einer Stalldatendiskette (2), einer Parameterdiskette (3), einer Fehlerbehandlungsdiskette (4), einem Drucker für den Bericht (5), dem Startknopf (6) und dem Ausschaltknopf (7).

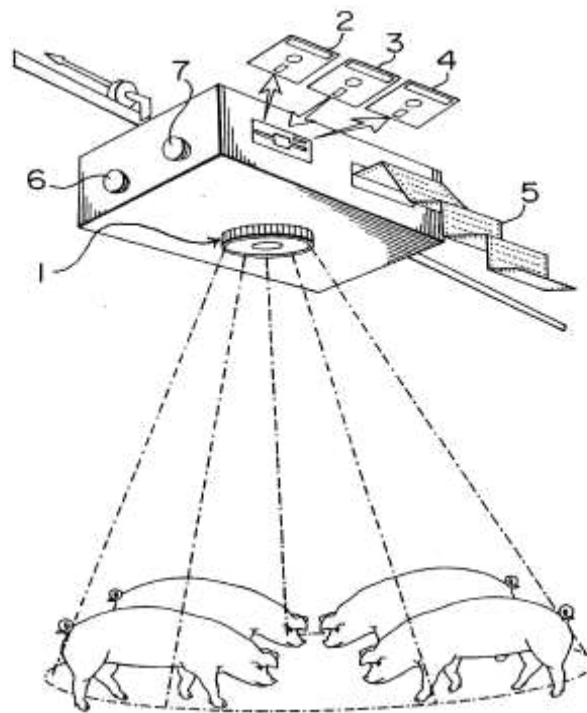


Abbildung 9: Thermographischer Sensor zur Erfassung von Schweinen [Quelle: Hurnik et al. 1995]

Über die thermographische Bildkamera werden der Aufenthaltsbereich, die Anzahl der Tiere, das Gewicht und die Körpertemperatur ermittelt. So können zum Beispiel Temperaturveränderungen bei den Tieren festgestellt und somit Rückschlüsse auf den Gesundheitszustand gezogen werden. Auf diese Weise können nach HURNIK et al. [1995] Infekte, Verletzungen oder Prellungen, sowie Erschöpfungen und Stress rechtzeitig erkannt und behandelt werden.

Das von HURNIK et al. [1995] entwickelte System beinhaltet Methoden zur Konvertierung der Bilder in eine für den Computer lesbare Form, sowie Methoden zur Interpretation und zur Darstellung der Ergebnisse in einer für den Landwirt verständlichen Form. Im Computer wird das Bild in Zahlenarrays umgewandelt, die durch eine Software interpretiert werden können. Die Position einer Zahl im Array entspricht einer Pixelposition in der Szene, ihr Wert entspricht der Helligkeit des Pixels. Anhand der Anzahl der Pixel wird die Auflösung des Bildes bestimmt, diese reicht von 256 x 256 bis 1024 x 1024 Pixel.

Die Fernerkundung kann auch bei der Dokumentation der Gewichtsentwicklung von Mastschweinen angewandt werden. Das Schwein wird hierbei mit einer Kamera aufgenommen und das Körpergewicht wird mit Hilfe von hinterlegten Algorithmen der digitalen Bildanalyse geschätzt [HESSEL & VAN DEN WEGHE 2008]. Durch diese opto-elektronische Methode der berührungslosen, kontinuierlichen und automatischen Gewichtsermittlung von Einzeltieren kann laut RATSCHOW [2003] eine spezifische Fütterung bezüglich der Futtermengen und Futterrezeptur durchgeführt werden, um das Tier durch Futterzuschläge, Futterabschläge und Rezepturveränderungen an die durchschnittliche Gesamtgruppenleistung heranzuführen.

### **3.2.2 Grünlandbewirtschaftung**

Der Bedarf an Grünland ist in den letzten Jahren stark zurückgegangen. Als Ursachen sehen ULLRICH et al. [2006] hierfür die stagnierenden Absatzmöglichkeiten für Rindfleisch nach der BSE-Krise und den Rückgang des Milchviehbestandes aufgrund steigender Milchleistungen der Einzelkuh. So waren in Deutschland im Jahr 2005 einige 100.000 ha Grünland ungenutzt [ULLRICH et al. 2006] und 47.000 ha Grünland gingen zwischen 2005 und 2006 durch Umbruch verloren [DEUTSCHER BUNDESTAG 2007]. Doch ein verstärkter Grünlandumbruch kann eine erhebliche Belastung der Umwelt nach sich ziehen, so dass die Erhaltung von Grünland besonders auf erosionsgefährdeten Böden bzw. bei Böden mit hohem Grundwasserspiegel enorm wichtig ist [DEUTSCHER BUNDESTAG 2006], [ULLRICH et al. 2006].

Bei der Grünlandbewirtschaftung wird zwischen extensiver und intensiver Bewirtschaftung unterschieden. Intensiv genutzte Flächen werden vom Landwirt bewirtschaftet, das heißt, sie werden zur Stallfutttergewinnung gemäht und gedüngt. Extensiv genutzte Flächen hingegen werden nicht gemäht sondern vom Vieh abgegrast.

Die Bewirtschaftung des Grünlandes soll nach den Richtlinien für „Gute landwirtschaftliche Praxis“ erfolgen. Hierzu zählen nach ULLRICH et al. [2006] die räumliche Trennung von Jungrinderweide und Milchrinderweide, die Regulierung des Wasserhaushaltes (geschlossene Grasnarbe, keine nassen Weiden) zur Vermeidung der Ansiedlung von Giftpflanzen oder Parasiten und eine ausreichende Tränkwasserversorgung.

### 3.2.2.1 Fernerkundung in der Grünlandbewirtschaftung

In der Grünlandbewirtschaftung können die Praktiken des Precision Farming, wie zum Beispiel Dünger- und Pflanzenschutzmittelapplikationen und die Unkrautbekämpfung angewendet werden [BLASCHKA 2003]. So kann zum Beispiel mit Hilfe des CROP-Meters, ein Sensor, der in der Fronthydraulik des Landfahrzeugs angebracht ist, die Stickstoffdüngung, die Halmstabilisation und die Fungizidausbringung realisiert werden [HÜTER et al. 2005]. Zur Unkrautregulierung wurde laut DEUTSCHEM BUNDESTAG [2006] eine sensorgesteuerte Querhacke entwickelt, die aber wegen zu hoher Kosten und zu geringer Schlagkraft bislang nicht in die kommerzielle Fertigung kam.

In der Abhandlung einer Dissertation hat SEMMT [2002] verschiedene Untersuchungen zur Abgrenzung von Grünland mit Hilfe der Fernerkundung angestellt. Hierbei stellte er fest, dass die Definition verschiedener Grünlandkategorien aus dem Luftbild heraus nur eingeschränkt möglich ist und eine räumliche Auflösung von 0,4 m zur Erfassung von Indikatorpflanzen zur Differenzierung einer guten oder schlechten Nährstoffversorgung nicht ausreicht. Nach SEMMT [2002] ist aber in Infrarotaufnahmen eine grobe Differenzierung des Grünlands nach der Bewirtschaftungsintensität (intensiv oder extensiv) möglich, da nur die intensiv genutzten Grünlandflächen vom Landwirt gemäht werden und dieses bei der Interpretation der Luftbilder entweder durch eine intensive Rottönung (vor der Mahd) oder einen bräunlich gelblichen Farbton (nach der Mahd) sichtbar wird.

Ferner untersuchte SEMMT [2002] die Nährstoffversorgung von Grünland mit Hilfe von Satellitenbildern. Da im nahen Infrarot höhere Grauwerte für Flächen mit guter Nährstoffversorgung auftreten, konnte SEMMT [2002] auf diese Weise Grünland von besserer und schlechterer Qualität differenzieren.

Wichtig für die Auswertung von Satellitendaten zur Grünlanderfassung ist es, zu beachten, dass Grünflächen ein unterschiedliches Reflexionsverhalten in Abhängigkeit der Bewirtschaftung aufweisen. So hat eine intensiv genutzte Fläche aufgrund von Düngung bereits im Frühjahr eine hohe Grasbedeckung, so dass bei Aufnahmen im Frühjahr hohe Reflexionswerte im nahen Infrarot auftreten [SEMMT 2002]. Im Spätsommer hingegen, wenn die Grünlandfläche zum Zweck der Heuernte gemäht wurde, zeigt sich laut SEMMT [2002] ein Reflexionsver-

ten, welches eigentlich für vegetationslose Flächen typisch ist, was zu einer unzuverlässigen Flächenerfassung führen kann. Bei extensiv genutzten Flächen verhält sich das Reflexionsverhalten aufgrund der fehlenden Düngung im Frühjahr und der fehlenden Mahd im Sommer genau umgekehrt.

Für die Erfassung von Grünland können alle Aufnahmesysteme verwendet werden, die über Spektralkanäle von grün bis zum nahen infrarot verfügen [SEMMT 2002].

### **3.3 Vorgelagerter Sektor**

Der der Landwirtschaft vorgelagerte Sektor liefert die zur Agrarproduktion notwendigen Güter wie Futtermittel, Landmaschinen, Dünge- und Pflanzenschutzmittel, Arzneimittel für Tiere und das Saatgut. Nachfolgend wird die Anwendung von Fernerkundung und Precision Farming in den einzelnen Bereichen des vorgelagerten Sektors erläutert.

#### **3.3.1 Futtermittelindustrie**

Der Anbau von Futterpflanzen umfasst Futtermittel von Ackerflächen, wie Winterweizen, Wintergerste, Roggen, Mais, Raps, Ackerbohne, Erbsen sowie verschiedene Futtergräser aus der Grünlandwirtschaft. Aus den Resten der Getreideproduktion wird Stroh geborgen. Wiesen- oder Weidenschnitt werden zur Silage- oder Heubereitung verwendet.

Wie bei allen landwirtschaftlich erzeugten Produkten kann bei der Erzeugung von Futtermitteln eine Ertragsvorhersage mit Hilfe der Fernerkundung durchgeführt werden. So kann laut YANG & EVERITT [2002] ein Zusammenhang zwischen der Reflexion im grünen, roten und NIR-Bereich und der Höhe des Ertrages festgestellt werden. Auch eine Ableitung des Futterertrags aus verschiedenen Vegetationsindizes ist möglich [VOß 2005], [CZISCH & TUTTENUJ 2008]. Aufgrund der hohen räumlichen Auflösung ist der Satellit Ikonos für eine Ertragsprognose am besten geeignet [VOß 2005].

Fernerkundungssensoren haben sich nach VOß [2005] auch zur Erfassung von Schädlingen und Erkrankungen von Pflanzen bewährt, da es hier zu einer Veränderung der Reflexion kommt. Vor allem im Infrarotbereich können Unterschiede in der Reflexionsintensität zwi-

schen gesunden und kranken Blattorganen festgestellt werden. Die Behandlung der Futterpflanzen mit Pflanzenschutzmitteln kann im Sinne von Precision Farming erfolgen. So wird mittels fahrzeuggestützten Sensoren die benötigte Menge an Pflanzenschutzmitteln erfasst und ausgebracht. Auch die Düngung kann teilflächenspezifisch erfolgen.

Für die Qualitätskontrolle bei der Futtermittelherstellung hat die Firma Zeiss ein Analysesystem, den TQC-Zeiss Feedanalyser, entwickelt. Mit diesem System können laut Zeiss mit Hilfe der Zeiss Dioden-Array Technologie und dem Drehteller TURNSTEP, welcher durch eine entsprechende Software unterstützt wird, in kürzester Zeit große Probemengen automatisch vermessen und analysiert werden. Die sich anschließende Datenverarbeitung läuft ebenfalls automatisch ab [ZEISS 2009].

Um den Probenvorbereitungsaufwand bei der Analyse von Futtermitteln zu reduzieren, kann laut LEITERER [2007] und DEUTSCHEM BUNDESTAG [2006] für verschiedene Kulturen während der Ernte eine Nahinfrarotspektrometrie zur Bestimmung von Qualität und Inhaltsstoffen von Futtermitteln angewandt werden. Hierbei können Stoffe wie Cellulose, Stärke, Stearin oder Wasser mit Hilfe ihrer Reflexionseigenschaften nachgewiesen werden [LEITERER 2007]. Anhand dieser spektrometrischen Untersuchungen können teilflächenspezifische Produktqualitätskarten erstellt werden [DEUTSCHER BUNDESTAG 2006].

### **3.3.2 Landmaschinenindustrie**

Große, international agierende Hersteller von Landmaschinen (z.B. John Deere und Claas) sowie Hersteller elektronischer Geräte und Software (z.B. Agrom) bieten laut DEUTSCHEM BUNDESTAG [2006] Softwarelösungen für die Schlagverwaltung, die Dokumentation ackerbaulicher Maßnahmen oder die Rückverfolgbarkeit von Produkten an. So gehören laut DEUTSCHEM BUNDESTAG [2006] beispielsweise Bordcomputer bei den meisten Landmaschinenherstellern längst zur Serienausstattung, und Jobrechner werden als Zusatzausstattung angeboten. Mit dem landwirtschaftlichen ISOBUS-System wird ein internationaler und herstellerübergreifender Datenaustausch zwischen verschiedenen elektronischen Komponenten gewährleistet [DEUTSCHER BUNDESTAG 2006].



Mitarbeiter in der Landmaschinenindustrie entwickeln Systeme zur Ertragskartierung und zur teilflächenspezifischen Ausbringung von Saatgut, Dünger und Pflanzenschutzmitteln. Hierzu gehört nach ENGEL [2006] die Entwicklung von Sensoren für Bodenuntersuchungen, zur Unkrautererkennung, zur Diagnose von Krankheiten sowie zur Untersuchung der Nährstoffversorgung. Mit der Einführung von Elektronik und Software in der Landmaschinenindustrie kamen laut [ENGEL 2006] neue Herausforderungen und Anforderungen an Verkauf und Support auf. So müssen zum Beispiel die neuen Technologien dem Kunden im Verkaufsgespräch erklärt werden, wozu viele Händler aber bislang nicht in der Lage sind [ENGEL 2006].

Landmaschinen besitzen eine GPS-gestützte Ortungstechnik zur Positionsbestimmung auf dem Feld [DEUTSCHER BUNDESTAG 2006]. Um die Genauigkeit der GPS-Signale zu korrigieren, wird, wie bereits in Kap. 3.1.3.2 beschrieben, das differential GPS (DGPS) verwendet. Für dieses Verfahren stehen verschiedene Referenzsignale zur Verfügung. Landmaschinenhersteller, die global auftreten, benötigen hier ein weltweit verfügbares Referenzsignal [ENGEL 2006]. Zu diesem Zweck hat die Firma John Deere nach ENGEL [2006] in Kooperation mit seiner Tochterfirma NavCom Technology einen DGPS-Empfänger namens Starfire entwickelt. Dieser ist bereits in den USA und Australien im Einsatz. Gemäß ENGEL [2006] kann der Starfire-Empfänger durch die Nutzung des GPS-Netzwerks der NASA und einer vom Jet Propulsion Lab (JPL) der NASA entwickelten Software eine Genauigkeit von  $\pm 10$  cm erreichen.

### 3.3.3 Düngemittel

Um die Düngermenge der ersten Stickstoffgabe (N-Gabe) zu ermitteln, wird mit Hilfe von Düngungsversuchen getestet, wie viel Stickstoff den einzelnen Kulturen im Frühjahr vor der ersten N-Gabe zur Verfügung stehen muss [YARA 2009, Feller et al.]. Dieser Wert wird als N-Sollwert bezeichnet. Um nun die tatsächlich auszubringende Düngermenge zu berechnen, muss von diesem N-Sollwert der bereits im Boden vorhandene Stickstoffgehalt, der so genannte Nmin-Vorrat, abgezogen werden [YARA 2009, Feller et al.]. Der im Boden vorrätige Stickstoffgehalt wird über eine Bodenanalyse in einer Bodentiefe zwischen 30 und 90 cm ermittelt [YARA 2009].

Bei dieser Analyse wird der Stickstoffgehalt im Boden entweder aus Mischproben, die dem Krumbereich des Bodens entnommen und im Labor analysiert werden, oder über die multispektrale Bodenreflexion vom Flugzeug aus bestimmt [RÖSCH et al. 2006]. Bei der multispektralen Stickstoffbestimmung wird laut RÖSCH et al. [2006] durch die Verknüpfung der Reflexionswerte bestimmter Wellenlängen ein Wert abgeleitet, der im Verhältnis zu einem gesuchten Merkmal steht. Auf diese Weise ist es möglich, den Stickstoffgehalt auf großen Flächen mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung zu erfassen.

Ein Nachteil dieses Verfahrens ist nach FELLER et al. [2007] der hohe Aufwand für die Durchführung der Feldversuche zur Ermittlung des N-Sollwerts, da für einige Gemüsearten auch mehr als ein Sollwert erforderlich ist.

Für die Bestimmung der zweiten und dritten N-Gabe hat die Firma YARA ein Stickstofftestgerät, den so genannten N-Tester entwickelt, mit dem es möglich ist, den Stickstoffgehalt der Pflanzen vor Ort zu messen. Hierbei wird mit Hilfe eines optischen Sensors bei 30 im Bestand gleichmäßig verteilten Pflanzen der Chlorophyllgehalt des jeweils jüngsten, voll entwickelten Blattes gemessen. Das Gerät berechnet dann den Mittelwert aller Messungen, der den Stickstoffgehalt im Feld widerspiegelt und so die genaue Abschätzung des Düngerbedarfs ermöglicht [YARA 2009].

Bei der Herstellung von Düngemitteln wird die Wirkung der Mittel auf Pflanzen und Boden in Feldversuchen untersucht. Hierbei werden nach YARA [2009] entweder die Anwendung unterschiedlicher Produkte bei jeweils unterschiedlich hohen Dosierungen oder die Düngungsergebnisse an verschiedenen Düngungsterminen miteinander verglichen. Das Testfeld besteht aus 10 - 15 m<sup>2</sup> großen Parzellen, die in 4-facher Wiederholung auf dem Versuchsfeld angelegt werden müssen, weil dadurch der Einfluss von Bodenunterschieden minimiert wird. Jede Parzelle wird einzeln beprobt, bonitiert und beerntet [YARA 2009].

Mit Hilfe der Fernerkundung werden nach KATSARAS [2004] die Nährstoffversorgung, der Reifezustand, die Verunkrautung und die Vitalität zur Beschreibung des Pflanzenzustands sowie die Bodenfeuchte und das Bodengefüge zur Beschreibung des Bodenzustands

untersucht. Tabelle 20 gibt einen Überblick über die Anforderungen an die Fernerkundung bezüglich der genannten Parameter.

Tabelle 20: Untersuchungsparameter und Anforderungskriterien für Düngemitteltests mit Fernerkundung [Quelle: KATSARAS 2004, verändert]

Parameter	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Aktualität der Daten
Nährstoffversorgung	5-10 m	wöchentlich	1 Tag
Reifezustand	3-5 m	wöchentlich	1 Tag
Verunkrautung	3-5 m	wöchentlich	1 Tag
Vitalität	10-25 m	monatlich	1 Monat
Bodenfeuchte	5-10 m	täglich	1 Tag
Bodengefüge	3-5 m	jährlich	1 Jahr

### 3.3.4 Pflanzenschutzmittel

Durch ungünstige Witterungsbedingungen oder Applikationsfehler können Pflanzenschutzmittel ihre Wirkung verfehlen und die Vitalität der Pflanzen negativ beeinflussen, so dass eine frühzeitige Informationsgewinnung über den Einfluss der Pflanzenschutzmittel auf Kulturlandschaften notwendig ist [DICKE & JACOBI 2007], die möglichst bereits bei der Herstellung des Pflanzenschutzmittels stattfinden sollte. Hierbei kommt die Fernerkundung zum Einsatz, da Vitalitätsunterschiede über die Anwendung von Vegetationsindizes nachweisbar sind. Auf Testfeldern wird ein Mittel mit verschiedener Dosis auf eine Kultur angewendet [DICKE & JACOBI 2007]. Mit Hilfe einer Multispektralkamera wird dann die Vitalität der Pflanzen bestimmt. Neben der Vitalität werden auch der Reifezustand, der Schädlingsbefall, die Verunkrautung, die Bodenfeuchte und das Bodengefüge mittels Fernerkundung untersucht [KATSARAS 2004]. In Tabelle 21 werden die Anforderungen an die Fernerkundung in Bezug auf die von KATSARAS [2004] genannten Parameter zusammengestellt.

Tabelle 21: Untersuchungsparameter und Anforderungskriterien für Pflanzenschutzmitteltests mit Fernerkundung [Quelle: KATSARAS 2004]

Parameter	Räumliche Auflösung	Zeitliche Auflösung	Aktualität der Daten
Reifezustand	3-5m	monatlich	ein Tag
Schädlingsbefall	3-5m	wöchentlich	eine Woche
Verunkrautung	5-10m	monatlich	eine Woche
Bodenfeuchte	3-5m	alle drei Tage	ein Tag
Bodengefüge	5-10m	jährlich	ein Jahr

Pflanzenschutzmittel bedürfen vor dem Verkauf einer amtlichen Zulassung. Hierbei muss nachgewiesen werden, dass die Mittel keine schädlichen Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen und auf den Naturhaushalt (Boden, Wasser, Luft, Tiere und Pflanzen) haben [IVA 2006]. Für diesen Nachweis sind in der Regel mehrere aufwändige und teure Feldversuche notwendig.

Um die Anzahl und die Kosten der Feldversuche zu reduzieren, haben die Firmen Spatial Business Integration (SBI) und Agricultural Development Consulting (ADC) den Site Similarity Certification (SSC)-Service entwickelt. Hierbei werden laut SBI & ADC [2006] an zwei oder mehr Standorten mit Hilfe von Satellitenbildern verschiedene Pflanzen- und Bodenparameter abgeleitet und miteinander verglichen. Somit können Ähnlichkeiten an verschiedenen landwirtschaftlichen Standorten nachgewiesen und die Untersuchungsergebnisse auf vergleichbare Regionen übertragen werden, da die Satellitenbilder den Pflanzenzustand in Abhängigkeit aller Standortfaktoren (Klima, Phänologie, Boden, Landnutzung, Ertragsniveau, Anbaumuster, Anbaupraktiken, Sorten) aufzeigen [SBI & ADC 2006]. Durch den SSC-Service kann neben der Anzahl und der Kosten von Feldversuchen auch das Risiko, dass ein Feldversuch beim Zulassungsverfahren nicht anerkannt wird und wiederholt werden muss, verringert werden [SBI & ADC 2006].

### 3.3.5 Arzneimittel

Aufgrund der großen Übereinstimmung in den grundlegenden Körperfunktionen zwischen Mensch und Tier werden viele Arzneimittel für Menschen auch zur Behandlung von Haus-, Nutz- oder Zootieren, zum Beispiel zur Behandlung von Schmerzzuständen oder Entzündungen eingesetzt [SRU 2007]. Auch Arzneimittel, die keine Zulassung für die Anwendung am Menschen mehr haben, werden weiterhin für die Tierbehandlung verwendet [SRU 2007].

Der Einsatz von Arzneimitteln für Tiere erfolgt laut SRU [2007] aber nicht nur zu Therapie-zwecken, sondern auch als vorbeugende Maßnahme in Form von Zusatzstoffen in Futtermitteln zur Gesunderhaltung des gesamten Bestandes [SRU 2007]. So werden in der Tierzucht laut HELMS [2006] in Deutschland nahezu doppelt so viele Arzneimittel eingesetzt wie in der Humanmedizin.

Umweltbeeinträchtigungen während der Produktion von Arzneimitteln sind laut SRU [2007] nur von untergeordneter Bedeutung, da Emissionen nur sehr gering auftreten und nur bei Unfällen größere Mengen von Arzneimittelwirkstoffen oder deren Zwischenprodukten freigesetzt werden können. Über die Ausscheidungsprodukte der Tiere können Medikamentenrückstände mit der Ausbringung von Wirtschaftsdünger in Form von Gülle oder Festmist auf die Felder und in die Umwelt gelangen [HELMS 2006]. Auch Tiere, die für die Lebensmittelproduktion verwendet werden, bekommen Arzneimittel verabreicht. Dadurch können laut BVL [2005] Medikamentenrückstände, die im Tierkörper verbleiben, in die Nahrungskette gelangen und so auch die Gesundheit der Menschen gefährden.

Arzneimittelrückstände im Boden und in Lebensmitteln sind mit den Methoden der Fernerkundung nicht ermittelbar. Die Untersuchung von Boden- und Lebensmittelproben auf Arzneimittelrückstände wird im Labor mit Hilfe eines HPLC-Systems mit Fluoreszenz-Detektor analysiert. HPLC ist eine Hochleistungsflüssigkeitschromatographie (engl. high performance liquid chromatography), mit der es möglich ist, Substanzen zu identifizieren und zu quantifizieren [WIKIPEDIA 2008b]. Die Chromatographie gehört zu den Verfahren, bei denen Stoffgemische untersucht werden, indem man sie in ihre einzelnen Bestandteile auftrennt. Fluoreszenzdetektoren messen die durch einen Anregungsstrahl ausgelöste Fluoreszenz, um fluoreszierende Stoffe zu erkennen.

Die Boden- oder Lebensmittelprobe wird in einer Durchflussmesszelle mit elektromagnetischer Strahlung in einem bestimmten Wellenlängenbereich (Anregungswellenlänge) bestrahlt [SIM 2008]. Die Fluorophoren (Moleküle, die zur Fluoreszenz fähig sind) in der Probe absorbieren das eingestrahlte, kurzwellige Licht und emittieren gleichzeitig ein längerwelliges Licht (Emissionswellenlänge) in alle Richtungen [SIM 2008]. Dieses Verhalten (Absorption von kurzwelligem Licht, Emission von längerwelligem Licht) wird als Fluoreszenz bezeichnet. Der Messbereich des Fluoreszenz-Detektors reicht von ultraviolett (0,20  $\mu\text{m}$ ) bis rot (0,65  $\mu\text{m}$ ) bzw. von ultraviolett (0,20  $\mu\text{m}$ ) bis zum nahen Infrarot (0,90  $\mu\text{m}$ ) [KNAUER 2004].

### **3.3.6 Saatgutwirtschaft**

Die Saatguterzeugung besteht aus drei Stufen: dem Vorstufensaatgut, dem Basissaatgut und dem zertifizierten Saatgut. Das Vorstufensaatgut, welches aus der Erhaltungszüchtung stammt, ist eine dem Basissaatgut vorhergehende Generation [MLR 2008]. Für das Vorstufensaatgut gelten die gleichen Anforderungen wie für das Basissaatgut. Vorstufensaatgut kann aus anerkanntem Vorstufensaatgut gewonnen werden, da es aber nicht zwingend anerkannt werden muss, kommt auch die Gewinnung aus Zuchtgartengemischen in Betracht [MLR 2008].

Basissaatgut entsteht aus dem Vorstufensaatgut und ist das Ausgangsmaterial für die Entstehung des zertifizierten Saatguts. Es wird laut Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum [MLR 2008] nach den Grundsätzen systematischer Erhaltungszüchtung produziert und unterliegt der Anerkennungspflicht für Saatgut. Das Saatgut darf nur von dem Züchter, der für die Sorte in der Sortenliste eingetragen ist, oder unter dessen Aufsicht und nach dessen Anweisung produziert werden [MLR 2008].

Zertifiziertes Saatgut entsteht unmittelbar aus dem Basissaatgut oder aus anerkanntem Vorstufensaatgut [MLR 2008]. Es gibt zertifiziertes Saatgut erster und zweiter Generation. Für den Verkauf von zertifiziertem Saatgut besteht eine Anerkennungspflicht.

Auch bei der Saatguterzeugung kann der bereits erwähnte Site Similarity Certification-Service von Spatial Business Integration (SBI) und Agricultural Development Consulting (ADC) angewandt werden. Der SSC-Service nutzt Satellitenbilder zum Vergleich von zwei oder mehr Standorten zur Prüfung von ähnlichen Wachstumsbedingungen [SBI & ADC 2006]. Auf diese Weise ist es laut SBI & ADC [2006] möglich, die Ergebnisse für einmal erprobtes Saatgut auf andere Regionen zu übertragen. So beschreiben SBI & ADC [2006] zum Beispiel, dass eine in Polen und Frankreich getestete neue Weizensorte durch einen Vergleich der Standortbedingungen zwischen den Testgebieten (Polen, Frankreich) und einem neuen Vermarktungsgebiet (z.B. Schweden) die Landwirte am neuen Standort von der neuen Sorte durch einen Ähnlichkeitsnachweis überzeugen kann.

Mit Hilfe der Fernerkundung können die Vitalität und der Reifezustand des Saatguts untersucht werden [KATSARAS 2004]. Zur Untersuchung der Vitalität sind Sensoren erforderlich, die Aufnahmen mit einer räumlichen Auflösung von 10 bis 25 m und einer zeitlichen Auflösung von einem Monat liefern können, die Untersuchung des Reifezustands erfordert Sensoren mit einer räumlichen Auflösung von 3 bis 5 m und einer zeitlichen Auflösung von einer Woche [KATSARAS 2004].

### **3.4 Nachgelagerter Sektor**

Der nachgelagerte Sektor der Landwirtschaft umfasst in einer ersten Verarbeitungsstufe Handelsmühlen für Brotgetreide, Hartweizenmühlen für Teigwaren, die Verarbeitung von Kartoffeln, Gemüse und Obst, Zuckerfabriken, Molkereien, Käsereien, Schlachthöfe und Metzgereien [BRANDES & ETZENSPERGER 2008, nach RENTSCH 2006]. Zu einer zweiten Verarbeitungsstufe gehören Bäckereien, die Herstellung von Süßwaren und veredelter Obst-, Gemüse- und Kartoffelprodukten sowie veredelter Milch-, Fleisch- und Eierprodukten [BRANDES & ETZENSPERGER 2008, nach RENTSCH 2006]. An die erste und zweite Verarbeitungsstufe schließen sich der Endvertrieb über den Groß- und Einzelhandel und das Gastgewerbe an.

Über die Anwendung der Fernerkundung in dem der Landwirtschaft nachgelagerten Sektor gibt es in der Literatur keine Hinweise. Auch eine Umfrage bei Molkereien, Schlachtereien und Herstellern von Biolebensmitteln in Deutschland und der Schweiz brachte keine Hinweise auf den Einsatz von Fernerkundungsverfahren. Die Frage nach der Anwendung von Methoden der Fernerkundung in ihrem Betrieb wurde von allen Befragten mit „nein“ beantwortet. Es ist üblich, dass die landwirtschaftlichen Betriebe persönlich aufgesucht werden, um sich dort vom Zustand der Tiere und Pflanzen zu überzeugen.

Der nachgelagerte Sektor ist zur Gewährleistung der Qualitätssicherung und des Verbraucherschutzes verpflichtet, die Rückverfolgbarkeit der Herkunft und Weiterverarbeitung von Lebensmitteln zur Dokumentation aller ausgeführten Maßnahmen zu sichern. So muss zum Beispiel laut WIKIPEDIA [2008c] der Lebensmittelhändler genau angeben können, welche Backwaren er von welchem Bäcker bezogen hat, der Bäcker muss belegen können, aus welcher Mühle er wann welches Mehl erhielt, der Müller muss jederzeit nachweisen können, von welchem Landwirt er wann welches Getreide bezog, in welchem Silo es gelagert wurde und welche Charge Mehl daraus gemahlen wurde. Nähere Erläuterungen zur Rückverfolgbarkeit pflanzlicher und tierischer Lebensmittel erfolgen im nachfolgenden Abschnitt.

### **3.5 Administration**

#### **3.5.1 Verbraucherschutz - Qualitätssicherung durch Rückverfolgung**

Verbraucher fordern die Rückverfolgbarkeit von landwirtschaftlichen Produkten. Diese Forderung wurde von der Politik in Gesetzen berücksichtigt. Die EU-Verordnung 187/2002, die zum 1. Januar 2005 in Kraft getreten ist, fordert eine durchgängige Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln für alle in der Kette der Lebensmittelerzeugung beteiligten Unternehmen, das heißt sowohl der Sektor der landwirtschaftlichen Produktion als auch der vor- und nachgelagerte Sektor sind zur genauen Dokumentation aller relevanten Maßnahmen verpflichtet [DEUTSCHER BUNDESTAG 2006]. Von der Aussaat bis zur Ernte muss jeder Verarbeitungsschritt dokumentiert werden. Der Landwirt muss jederzeit nachweisen können, welche Betriebsmittel er von welchem Lieferanten gekauft hat, welche Maßnahmen er innerhalb der einzelnen Produktionszweige des landwirtschaftlichen Betriebes durchgeführt hat und an wen er die Produkte anschließend verkauft hat [DEUTSCHER BUNDESTAG 2006], [WIKIPEDIA 2008c].



Der Landwirt unterliegt einer Dokumentationspflicht über die Art der Erzeugung (ökologisch oder konventionell) sowie zu allen Düngungs- und Pflanzenschutzmaßnahmen. Die Düngeverordnung erfordert feldbezogene Aufzeichnungs- und Bilanzierungsvorschriften für Stickstoff und Phosphat sowie Abstandsauflagen für die Ausbringung von Düngemitteln in der Nähe von Gewässern [DEUTSCHER BUNDESTAG 2006]. Diese Forderungen kann der Landwirt mit Hilfe der Methoden des Precision Farming einhalten und dokumentieren.

Die Aufzeichnung von Betriebsabläufen und produktionstechnischen Maßnahmen stellt allerdings hohe Anforderungen an die Landwirte, ist zeitaufwendig und erfordert eine gute Organisation bei der Datenverwaltung [DEUTSCHER BUNDESTAG 2006]. Durch neue Gesetze, Verordnungen und Regelungen wird der Dokumentationsaufwand immer weiter erhöht. Die Dokumentation erfolgt meistens handschriftlich oder als elektronische Ackerschlagkartei [DEUTSCHER BUNDESTAG 2006].

Damit die Dateneingabe möglichst wenig Zeitaufwand beansprucht, werden immer mehr Daten auch automatisiert erfasst [DGL 2007]. Die automatisierte Erfassung von Arbeits- und Maschinendaten wird laut DGL [2007] mit Bordcomputern oder Handheld-Computern, die Schlagerkennung und Schlagvermessung mit GPS ermöglicht. Weiterhin sind die automatische Erfassung von Arbeits- und Wegezeiten und der verwendeten Dünge- und Pflanzenschutzmittel möglich, nur die Dosis von Dünge- und Pflanzenschutzmitteln muss noch per Hand eingegeben werden [DGL 2007]. Durch die automatisierte Aufzeichnung aller pflanzenbaulichen Maßnahmen kann der Landwirt jederzeit nachweisen, dass er seine Bewirtschaftungsmaßnahmen ordnungsgemäß und den gesetzlichen Bestimmungen entsprechend durchgeführt hat [SCHULZ 2006].

Auch bei Lebensmitteln tierischer Herkunft ist ein System zur lückenlosen Dokumentation aller Daten entlang der gesamten Wertschöpfungskette erforderlich, um eine wirksame Rückverfolgbarkeit und Qualitätssicherung zu erzielen [DOLUSCHITZ & ENGLER 2008]. Die Rückverfolgung von Fleisch erfolgt im Sinne des Precision Livestock Farming durch die Kennzeichnung der Tiere mit injizierbaren Transpondern, um so das Leben des Einzeltiers von der Geburt bis zur Schlachtung zurückverfolgen zu können [LfL 2004]. Die Kennzeich-

erfolgt laut LfL [2004] in der Bauchhöhle, wo die Tiere bereits in der ersten Lebenswoche problemlos gekennzeichnet werden können, ohne dass die Größe des Transponders negative Auswirkungen auf das Tier hätte.

Auch der Transport der Tiere zum Schlachthof ist informationstechnologisch zu überwachen. JACOB und KIRN [2008] beschreiben die Anwendung einer Sensor- und Telematikinfrastruktur zur Überwachung von Langstreckentransporten lebender Tiere. Hierbei wird mit Hilfe von RFID (Radio Frequency Identification) die Identifizierung der Tiere bereits vor der Verladung und mit Hilfe von Sensoren die Messung von Umgebungsfaktoren sowie die Überwachung der Situation der Tiere im Anhänger ermöglicht [JACOB & KIRN 2008].

Im Tiertransportanhänger werden über ein zentrales BUS-System alle Sensoren (zwei Temperatursensoren, ein GPS-Sensor, ein Tränkenfüllstandssensor sowie ein Sensor für die Ladeklappe) angeschlossen und es wird eine RFID-Leseinheit in das portable Informationssystem des Fahrers integriert [JACOB & KIRN 2008]. Die Anbindung nach außen erfolgt nach JACOB und KIRN [2008] entweder über ein Mobilfunknetzwerk (GPRS, UMTS) auf der Straße oder WLAN im Betriebshof oder beim Kunden [vgl. Abb. 10].

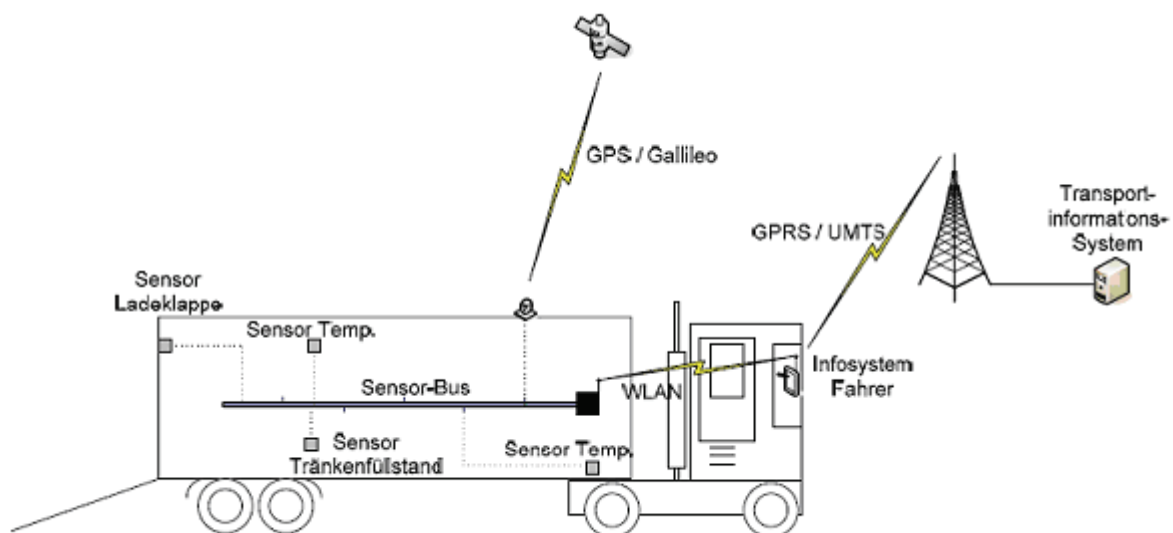


Abbildung 10: Infrastruktur des Tiertransporters [Quelle: JAKOB & KIRN 2008]

Seit 2007 sind für neue Transporter für lebende Tiere Komponenten zur Ortung sowie Laderaum-Sensoren zur Überwachung von Temperatur und Ladeklappe durch die EU vorgeschrieben und ab Anfang 2009 müssen auch alle bereits vorhandenen Transporter mit den entsprechenden Systemen nachgerüstet werden [JACOB & KIRN 2008].

Die Rückverfolgbarkeit über alle Stufen der Wertschöpfungskette erfordert neue Modelle der Datenspeicherung, der Datenverwaltung und der Datenweitergabe, um doppelte Aufzeichnungen für unterschiedliche Nutzungen zu vermeiden [SCHULZ 2006]. Für den ungehinderten Datenaustausch entstehen laut SCHULZ [2006] aber oftmals Probleme aufgrund nicht verfügbarer oder unzureichender Datenstandards.

Um in Zukunft den ungehinderten Datenaustausch zwischen allen Stufen der Wertschöpfungskette zu gewährleisten, wurde vom KTBL und der Fachhochschule Bingen die standardisierte Datenaustauschsprache agroXML entwickelt [DOLUSCHITZ & KUNISCH 2004]. Diese wird von der Agrarsoftwarebranche, der Landtechnikindustrie sowie der Agrarforschung unterstützt und vom Internationalen Konsortium W3C gepflegt [DOLUSCHITZ & KUNISCH 2004].

AgroXML ist eine Form der Sprache XML (eXtensible Markup Language) und besteht aus dem agroXML-Schema und dem agroXML-Lexikon. Im agroXML-Schema sind nach DOLUSCHITZ & KUNISCH [2004] die Struktur und die Hierarchie der landwirtschaftlichen Begriffswelt hinterlegt und im agroXML-Lexikon werden die landwirtschaftlichen Fachbegriffe definiert und mit Synonymen versehen. Die Datenaustauschsprache agroXML ist öffentlich und firmenunabhängig und steht somit jeder Zeit für alle Nutzer zur Verfügung [SCHULZ 2006].

Zum Austausch von Daten in der Tierproduktion steht neben agroXML auch das ISO-Projekt Network-Livestock-Farming bzw. ISOagriNET zur Verfügung [DOLUSCHITZ & ENGLER 2008]. Der ISOagriNET-Standard legt allgemeingültige Standards für die Elektronik in der Tierhaltung fest [SCHULZ 2006] und wird nach DOLUSCHITZ & ENGLER [2008] zur internen Kommunikation bzw. zum Daten- und Informationsaustausch zwischen Geräten und Software im Betrieb verwendet. Der agroXML-Standard dient dem Datenaustausch mit exter-

nen Partnern, wie der HIT-Datenbank, dem Landeskontrollverband, Tierärzten oder dem Veterinäramt [DOLUSCHITZ & ENGLER 2008].

Anforderungen an künftige informationstechnologische Entwicklungen für die Rückverfolgbarkeit sind nach SCHULZ [2006]:

- leicht bedienbare, nutzerfreundliche, fehlertolerante und systemübergreifende Anwendungsprogramme
- der Landwirt behält die Hoheit über seine Daten und entscheidet selbst, wer wann auf welche Daten Zugriff hat
- Vermeidung von Insellösungen, so dass ein ungehinderter Datentransport zwischen den einzelnen Anwendungen und somit die Vernetzung zwischen den Marktpartnern ermöglicht wird
- Nutzung modernster Technologien auch in der Ausbildung

### **3.5.2 Landwirtschaftsverwaltung – Förderungen durch InVeKoS**

Nach der Verordnung (EWG) Nr. 3508/92 hat jeder Mitgliedsstaat der Europäischen Union (EU) ein integriertes Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS) im Bereich tierischer und pflanzlicher Produktion einzurichten [BÖHME 2003]. InVeKoS umfasst nach BÖHME [2003] eine informatisierte Datenbank, ein System zur Identifizierung landwirtschaftlicher Parzellen, ein System zur Identifizierung und Registrierung von Tieren, ein System zur Bearbeitung von Beihilfeanträgen und ein integriertes Kontrollsystem. InVeKoS regelt Ausgleichszahlungen an die Landwirte und führt Kontrollen durch, ob die beantragte Kultur angebaut wurde und ob angegebene Flächengrößen eingehalten wurden [SPITZER & LUDWIG 2003].

Um eine Förderung (Ausgleichszahlung) zu erhalten, müssen die Landwirte einen schriftlichen Antrag stellen, in dem Informationen über Betriebsgröße und Flächennutzung enthalten sind. Diese Informationen müssen durch die Vorlage von Flächennachweisen mit Belegen (Katasterunterlagen, Grundlagekarten, Luftbilder) für alle bewirtschafteten Flächen nachgewiesen werden [TLL & DJO 2000].

Von allen Landwirten, die einen Antrag auf Flächenbeihilfe im Rahmen von InVeKoS gestellt haben, werden mindestens 5 % kontrolliert [BÖHME 2003]. Die Kontrolle kann klassisch mit Hilfe von GPS oder durch die Anwendung der Fernerkundung erfolgen [BÖHME 2003].

Die Fernerkundung dient im Rahmen von InVeKoS laut CASACA et al. [2003] zur Identifizierung landwirtschaftlicher Parzellen auf Basis von Katasterplänen und Katasterunterlagen. Die Bestimmung der Flächengröße erfolgt mit Hilfe von Luftbildern, die Bestimmung der Flächennutzung durch Satellitenbilder.

Für die Kontrolle mittels Satellitenbildern sind kurze Wiederholraten, schnelle Bezugszeiten und eine räumliche Auflösung unter 1m notwendig. Da diese Voraussetzungen in der Regel nicht erfüllt sind, ist die Anwendung von Luftbildern besser geeignet. Der beste Aufnahmezeitpunkt für Winterkulturen ist nach BÖHME [2003] der Herbst, für Sommerkulturen Anfang Juli.

Die Kontrollen finden in der Regel unangekündigt statt. Treten Abweichungen zu den Angaben im Antrag auf, so sind diese durch Ausgleichszahlungen oder Sanktionen auszugleichen [GAF 1999]. Landwirte sind verpflichtet, geförderte Flächen in Geographischen Informationssystemen (GIS) nachzuweisen [TLWJF 2003].

### **3.5.3 Umweltministerium**

Die Landwirtschaft, welche über Jahrhunderte hinweg das Bild unserer Kulturlandschaft geprägt hat, hat eine enorm hohe Bedeutung für die Umwelt. Die Bewahrung der Schutzgüter Boden, Wasser und Luft stimmt jedoch laut DEUTSCHEM BUNDESTAG [2006] nicht immer mit den landwirtschaftlichen Anbaumethoden überein, so dass die Landwirtschaft vielfach zu beachtlichen negativen Auswirkungen auf Umwelt und Natur führt.

### 3.5.3.1 Fernerkundung zur Untersuchung von Bodenerosion

Bodenerosion wird durch die Ablösung, den Transport und die Ablagerung von Bodenpartikeln durch den Menschen, durch Niederschläge oder durch den Wind verursacht. Bodenbedeckung und Bodenbewirtschaftung sind Verursacher von Wassererosion. Je höher die Vegetationsbedeckung auf einer Fläche ist, desto geringer sind Erosionserscheinungen, da Vegetation Ablösung und Verschlammung des Bodens vermindert. Pfluggrillen und Fahrspuren sind besonders anfällig für das Auftreten von Bodenerosion. Maßnahmen, um Erosionserscheinungen zu vermeiden oder möglichst gering zu halten, sind konservierende (pfluglose) Bodenbearbeitung, Zwischenfruchtanbau, Mulchen [MENGE 2005], die Bewirtschaftung quer zu Hangneigung und die Verwendung druckarmer Breitreifen [TLL & DJO 2000].

Folgen der Erosion sind nach TLL & DJO [2000] die Entstehung neuer Bodentypen, die Veränderung der chemischen und physikalischen Eigenschaften des Bodens, die Veränderung des Reliefs und die Veränderung der Bodentextur.

Mit Hilfe der Fernerkundung können aktuelle und langfristige Erosionsschäden untersucht werden, da die aufgrund der Erosion hervorgerufenen Bodenveränderungen eine Veränderung der Reflexionseigenschaften nach sich ziehen [TLL & DJO 2000]. Für die Erkennung von Erosionsspuren werden Sensoren mit hoher spektraler und räumlicher Auflösung wie IRS-1C/1D oder Luftbilder mit einer Auflösung von weniger als 1 m in Form von digitalen Orthophotos verwendet [TLL & DJO 2000].

Die räumliche Auflösung derzeit zur Verfügung stehender Satelliten ist nach TLL & DJO [2000] allerdings nicht ausreichend für die Kartierung von Erosionsspuren. Panchromatische Daten mit einer Auflösung von weniger als 1m seien laut TLL & DJO [2000] zwar ausreichend für die Interpretation von Erosionsspuren, aber bei multispektralen Daten hebt sich das spektrale Erscheinungsbild der Bodenbereiche selbst bei einer Auflösung von 1m nicht ausreichend von anderen Landschaftsbereichen ab.

Ein weiteres Problem bei Satellitenaufnahmen stellt die zeitliche Auflösung dar, da die Aufnahme möglichst unmittelbar am Tag des Ereignisses (z.B. nach schwerem Niederschlag) erstellt werden muss. Hier wären Luftbilder besser geeignet, aber nach TLL & DJO [2000] ist

es hier nicht möglich, aktuelle und langfristige Flächenerosionen, die für die Existenz von Feldheterogenitäten verantwortlich sind, zu identifizieren. Die Zeit zwischen dem Ereignis und der Aufnahme muss weniger als eine Woche betragen, und es müssen zum Vergleich Aufnahmen existieren, die unmittelbar vor dem Ereignis erstellt wurden.

### **3.5.3.2 Fernerkundung zur Untersuchung von Umweltschäden durch Tierhaltung**

Durch die Tierhaltung kann auf vielfältige Weise die Umwelt geschädigt werden. Durch Verdauungsprozesse zum Beispiel entstehen Treibhausgase wie Methan und Distickstoffoxid (Lachgas), die in die Atmosphäre gelangen können [HIRSCHFELD et al. 2008]. Etwa 95 % der Gesamtemissionen in Deutschland werden nach RATSCHOW [2003] durch die Landwirtschaft verursacht, 83 % hiervon allein durch die Tierhaltung (Rindviehhaltung 45 %, Schweinehaltung 25 % und Geflügelhaltung 10 %).

Für die Messung von Treibhausgasen in der Atmosphäre haben niederländische und deutsche Forscher 1993 den Atmosphären-Sensor SCIAMACHY (Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography) entwickelt [NIVR 2009]. Der Sensor befindet sich auf dem Umweltsatelliten Envisat und misst Licht im Wellenlängenbereich von 0,24  $\mu\text{m}$  (ultraviolett) bis 2,38  $\mu\text{m}$  (nahes Infrarot) und bestimmt so die Absorptions-, Reflexions- und Streuungscharakteristiken der Atmosphäre [DLR 2002].

Auch der Einsatz von Medikamenten stellt eine Gefahr für die Gesundheit von Mensch und Tier dar und ist mit Risiken für die Umwelt verbunden [SRU 2008]. Der Einsatz von Antibiotika kann zur Ausbreitung von Resistenzen beim Menschen beitragen, da bei der Fleischproduktion Medikamentenrückstände in die Lebensmittel gelangen können [SRU 2008]. Über die Ausscheidungsprodukte der Tiere gelangen Arzneimittel direkt bei der Weidehaltung oder indirekt über die Ausbringung von Gülle oder Festmist in die Böden und können somit die Umwelt schädigen [SRU 2008].

Arzneimittelrückstände in Böden und Lebensmitteln können mit Verfahren der Fernerkundung nicht untersucht werden. Hier werden Methoden der Chromatographie und der Spektroskopie angewandt. Die Chromatographie untersucht in einem Trennsystem die verschiedenen

Wandergeschwindigkeiten von Stoffen in einem Gemisch, die Spektroskopie nutzt die Fähigkeit eines Stoffes, Licht in verschiedenen Wellenlängen zu erzeugen oder aufzunehmen [HOFFER 2009].

### **3.5.3.3 Umweltschadensbeobachtungen mit Hilfe der Fernerkundung**

Weitere durch die Landwirtschaft herbeiführte Umweltschäden sind die Erhöhung des Treibhauseffekts, Desertifikation (= Ausbreitung wüstenähnlicher Verhältnisse), Eutrophierung (= Gewässeranreicherung mit Pflanzennährstoffen) und ein Artenrückgang, verursacht durch Monokulturen, Begradigung von Wasserläufen und Flurstücken, Umbruch von Grünland, Bodenverdichtung und Auslaugung und ein fehlendes Wassermanagement [KATSARAS 2004]. Weitere Ursachen für die Schädigung der Umwelt sind Einträge von Stickstoffverbindungen und Pflanzenschutzmitteln sowie ein zu hoher Viehbesatz [SRU 2008].

Durch die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln können Wirkstoffe in die Umwelt eingetragen werden und somit zu einer Belastung von Boden und Wasser führen und die biologische Vielfalt negativ beeinflussen [SRU 2008]. So können nach SRU [2008] zum Beispiel seit mehreren Jahren erhöhte Wirkstoffkonzentrationen von Pflanzenschutzmitteln im Grundwasser und Überschreitungen der Grenzwerte für Trinkwasser gemessen werden.

Durch landwirtschaftliche Stickstoffüberschüsse kommt es zur Eutrophierung natürlicher Lebensräume. Weitere Probleme, die durch die Freisetzung von Stickstoffverbindungen verursacht werden, sind die Erhöhung der Nitratwerte im Grundwasser [FRAUENHOLZ et al. 2000], die Versauerung der Böden sowie die Beschleunigung des Klimawandels [SRU 2008]. Der DEUTSCHE BUNDESTAG [2006] erwähnt in diesem Zusammenhang die Überschreitung des aus umweltpolitischen Aspekten akzeptablen Grenzwertes von 100 kg N/ha/Jahr bei den nationalen Stickstoffbilanzsalden.

Das im Boden enthaltene Nitrat wird als Lachgas emittiert, das wiederum in die Atmosphäre gelangt. Der Nitratgehalt im Boden kann mit Hilfe eines Bodenspektrophotometes ermittelt werden. Hierbei wird nach RÖSCH et al. [2006] die Reflexion der Furchensohle mit Hilfe eines speziellen Werkzeugs gemessen, aus der nach umfangreicher Datenaufbereitung Beziehungen zum Nitratgehalt des Bodens abgeleitet werden können. Der Anteil des in der



Atmosphäre enthaltenen Lachgases kann mit dem in Kap. 3.5.3.2 beschriebenen Fernerkundungssensor SCIAMACHY bestimmt werden.

Folgende, von MENGE [2005] genannten Maßnahmen wirken den Umweltbeeinträchtigungen entgegen:

- Verzicht auf die Umwandlung von Grünland in Ackerland
- Einhaltung einer standortangepassten ausgewogenen dreifeldrigen Fruchtfolge
- Anbau standortgerechter Sorten
- Nichtüberschreitung des Viehbesatzes
- angemessene Pflanzenschutzmaßnahmen
- Reduzierung der Stickstoff-Düngung
- Verzicht auf die Anwendung von Wachstumsregulatoren
- Zwischenfruchtanbau, Untersaaten, Mulchsaaten

Diese Maßnahmen werden heute zum großen Teil bereits durch Precision Farming durchgeführt.

## 4. Forstwirtschaft

### 4.1 Waldklassifikation durch Fernerkundung

Waldklassifikation wird verwendet, um mit Hilfe von Attributen Unterschiede zwischen den zu kartierenden Objekten zu bestimmen oder den Klassen, basierend auf diesen Unterschieden, einzelne Objekte zuzuordnen [FRANKLIN 2001]. Bei der Klassifikation von Wald wird die Landbedeckung in 4 Levels eingeteilt, die von HOWARD [1991] folgendermaßen beschrieben werden:

- Level 1 umfasst die Einteilung in die Klassen Wald und Nichtwald und wird mit Hilfe von Satelliten, wie zum Beispiel Landsat MSS erfasst. Level 1-Klassen werden auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene erfasst.
- Level 2 umfasst die Einteilung in die Klassen Nadel-, Laub- und Mischwald sowie Weideland für die Klasse Nichtwald und wird mit Flugzeugen in großer Höhe aufgenommen. Level-2 Klassen können auch mit Hilfe von Satelliten aufgenommen werden und werden genau wie die Level 1 Klassen auf regionaler, nationaler und internationaler Ebene erfasst.
- Level-3 umfasst die Gruppierung von Baumarten und wird mit Flugzeugen in 3000-12000m Höhe aufgenommen. Level-3 Klassen werden auf lokaler Ebene erfasst.
- Level 4 unterteilt die Bäume nach Art und Alter und wird mit Flugzeugen in einer Höhe unter 3.000m aufgenommen. Level-4 Klassen werden wie Level-3 Klassen auf lokaler Ebene erfasst.

Multispektralaufnahmen liefern raumbezogene Messwerte, so dass jede Klasse von Waldeigenschaften aufgrund ihrer eigenen spektralen Signatur unterschieden und kartiert werden kann [Franklin et al. 2003]. Die Klassifikation anhand von Fernerkundungsdaten kann in jedem Maßstab erstellt und gedruckt werden, aber die Auflösung der Quelldaten entscheidet über die Kartenqualität [FRANKLIN 2001]. Die Differenzierung von Laub- und Nadelbäumen ist bei panchromatischen Schwarzweißaufnahmen nur im Mai, im Juni und im September möglich. Bei Schwarzweißinfrarotfilmen besteht die Möglichkeit der Differenzierung während der gesamten Vegetationsperiode [HILDEBRANDT & PEERENBOOM 1984].

Die Einteilung der Wälder in Laub- und Nadelwald ist nach HABERÄCKER et al. [1979] mit Landsat-MSS Daten mit einer Genauigkeit von 60 bis 70 % möglich. Die Kosten für die Aufnahme der Satellitenbilder liegen bei 0,25 €/ha [TLWJF 2003].

Eine weitere Klassifikationsmöglichkeit ergibt sich durch CORINE (Coordination of Information on the Environment), einem Programm der EU, das für alle Mitgliedstaaten die Bodenbedeckungsdaten nach einem einheitlichen Kartierungsschlüssel in digitaler Form erfasst hat [SEMMT 2002]. Grundlage der Erhebung für CORINE sind nach SEMMT [2002] Landsat-TM Daten, ergänzt durch topographische Karten im Maßstab 1:100.000 und durch panchromatische Luftbilder im Maßstab 1:70.000. Der Erhebungsmaßstab soll in Zukunft auf 1:25.000 vergrößert werden. Die untere Erfassungsgrenze für flächenhafte Objekte liegt laut SEMMT [2002] bei einer Mindestgröße von 500 m x 500 m (25 ha), was auf dem Auswertungsmaterial einer Fläche von 5 mm x 5 mm entspricht. 1997 gab es in Deutschland 36 Bodenbedeckungseinheiten, die in einer dreistufigen Hierarchie zusammengefasst sind [SEMMT 2002]. Ebene 1 umfasst Wälder und naturnahe Flächen, Ebene 2 umfasst Wälder, Strauch- und Krautvegetation sowie offene Flächen mit geringer Vegetation und Ebene 3 differenziert die Wälder in Nadel, Laub und Mischwald [SEMMT 2002].

#### **4.2 Anwendung der Fernerkundung zur Erfassung von Waldschäden**

Es besteht ein großes Interesse zur Erfassung und Überwachung von Veränderungen in Wäldern. Waldveränderungen sind auf verschiedene Art und Weise klassifizierbar. GONG & XU [2003] nennen hier zum Beispiel die Klassifikation nach:

- allmählichen oder plötzlichen
- langfristigen oder kurzfristigen
- normalen oder katastrophalen
- natürlichen oder anthropogenen
- umkehrbaren oder unwiderruflichen

Veränderungen.

Die erste bundesweite Waldschadenserhebung fand im Jahr 1982 statt [THEILEN-WILLIGE 1993]. Die Bäume werden hier anhand ihres Schadgrades in Schadstufen eingeteilt. Schadstufe 0 umfasst alle Bäume ohne Schäden, Schadstufe 1 alle schwach geschädigten Bäume und die Schadstufen 2-4 alle deutlich geschädigten Bäume [STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD 2008].

Nach dem Waldzustandsbericht von 2007 sind in Deutschland über zwei Drittel der Bäume krank [STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD 2008]. 2004 wurde aufgrund des extrem heißen und trockenen Sommers im Jahr 2003 ein Höchststand der Kronenverlichtungen festgestellt, 31 % aller Bäume zeigten deutliche Schäden, im Jahr 2007 lag der Anteil der deutlichen Schäden immer noch bei 25 % [STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD 2008].

Die Eiche ist der in allen Bundesländern am stärksten geschädigte Baum [STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD 2008], [BMELV 2008]. Sie wies im Jahr 2007 zu 49 % deutliche Kronenverlichtungen auf und zeigte einen Höchststand bei den Schädigungen durch Insekten [BMELV 2008]. Die Kiefer ist bundesweit der gesündeste Baum [STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD 2008], sie wies im Jahr 2007 zu 13 % deutliche Kronenverlichtungen auf [BMELV 2008]. Die Buche hat sich teilweise stark verbessert [STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD 2008], der Anteil an deutlichen Kronenverlichtungen ist gegenüber dem Vorjahr um 9 Prozentpunkte auf 39 % zurückgegangen [BMELV 2008]. Bei der Fichte war im Jahr 2007 der Anteil der deutlichen Kronenverlichtungen mit 28 % gegenüber dem Vorjahr (27 %) praktisch unverändert [BMELV 2008]. Nach STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD [2008] sind die Schäden insgesamt im Süden stärker als im Norden und im Westen stärker als im Osten. Abbildung 11 zeigt die Schädigungen von Fichte, Kiefer, Buche und Eiche nach dem Waldzustandsbericht 2007.

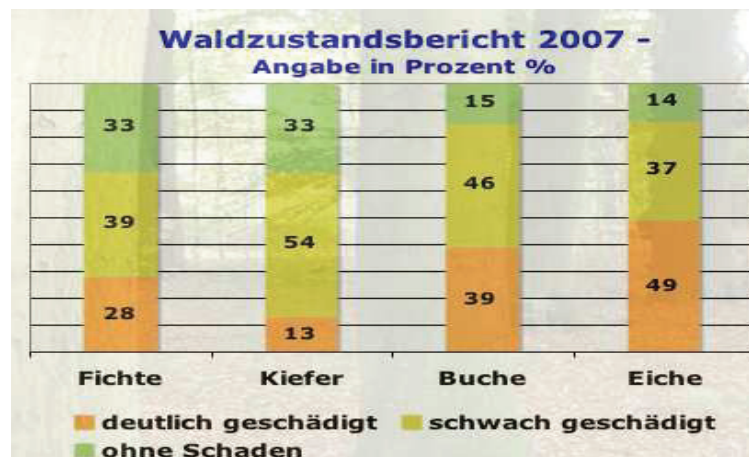


Abbildung 11: Schädigungen von Fichte, Kiefer, Buche und Eiche

[Quelle: STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD 2008]

Nach GONG & XU [2003] existieren drei Hauptursachen für diese Veränderungen:

- inneres Wachstum und evolutionäre Entwicklung
- natürliche Ursachen (Klima, Flut, Hurrikan, Feuer, Insekten, Krankheiten)
- menschliche Ursachen

Zu den menschlichen Ursachen zählen vor allem die Landwirtschaft und die Massentierhaltung, die zur Bodenversauerung durch Ammoniak aus Gülle oder Festmist beitragen [STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD 2006a]. Weitere Ursachen für Waldschäden, an denen Menschen beteiligt sind, sind nach STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD [2006a] die nasse Deposition, die trockene Deposition und die feuchte Deposition als Folge der Luftverschmutzung.

Unter nasser Deposition versteht man den Eintrag von Schadstoffen durch sauren Regen, der durch die chemische Reaktion von Regenwasser und Sauerstoff mit Stickoxiden aus dem Kraftverkehr und Schwefeldioxyden aus der Industrie entsteht und wichtige Pflanzennährstoffe (Magnesium, Kalium, Calcium etc.) im Boden verdrängt [STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD 2006a].

Bei der trockenen Deposition werden die Schadstoffe in Form von Gas oder Staub direkt von den Spaltöffnungen der Blätter aufgenommen und führen dort zur Minderung der Photosynthese, zur Minderung der Assimilation und zur Erhöhung der Transpiration, wodurch eine Vitalitätsminderung und vorzeitige Alterung der Blattorgane sowie eine Unterversorgung mit Wasser ausgelöst wird [STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD 2006a].

Bei der feuchten Deposition werden die Schadstoffe über Nebel oder Tau von der Pflanze aufgenommen, wodurch wichtige Nährstoffe aus den Blättern gelöst werden, was zu einer Einstellung der Stoffwechselprozesse und somit zu starken Schädigungen der Pflanze führt [STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD 2006a].

Die aufgrund von Deposition verursachten Nährstoff- und Vitalitätsverluste der Pflanzen sind mit Hilfe der Fernerkundung nachweisbar, da hier Unterschiede im Reflexions- und Emissionsverhalten zwischen gesunder und geschädigter Vegetation entstehen. So reflektieren gesunde Bäume nach SMIDT [2004] die Strahlen im nahen Infrarot stärker als geschädigte Bäume [vgl. Abb. 12].

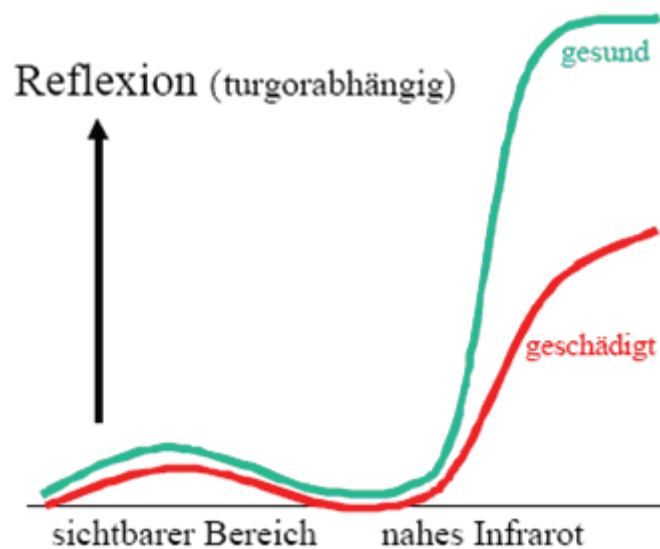


Abbildung 12: Reflexionsverhalten gesunder und geschädigter Bäume [Quelle: SMIDT 2004, verändert]

Weitere Voraussetzungen für die Beobachtung von Vegetationsschäden durch die Fernerkundung sind nach Akca et al. [1984]:

- gute Durchlässigkeit der Atmosphäre in diesen Bereichen
- Aufnahmesystem mit notwendiger spektraler Auflösung
- hohe geometrische Auflösung zur Differenzierung der Schadsymptome

Seit 1986 werden extensive Waldschadenserhebungen (auch Level I-Ebene genannt) durchgeführt, bei denen jährlich der Kronenzustand mit Hilfe der Satellitenfernerkundung erfasst wird [KAHABKA 2000]. Hierfür werden Stichprobenpunkte aufgenommen und ausgewertet. Das Level I-Netz von Deutschland besteht aus 406 Stichprobenpunkten, die mit 25 Landsat TM-Szenen erfasst werden können, so dass eine Szene im Durchschnitt 27 Punkte enthält [KAHABKA 2000].

Bei Untersuchungen der Waldschadenserfassung mit Landsat MSS-Daten wurde festgestellt, dass sich das System aufgrund des begrenzten räumlichen und spektralen Auflösungsvermögens nur zur Abgrenzung von bewaldeten Flächen und groben Waldtypen oder zur Kartierung von großflächigen Waldschäden eignet [COENRADIE 2003]. Landsat TM eignet sich nach COENRADIE [2003] aufgrund seiner besseren radiometrischen, spektralen und geometrischen Auflösungen auch für detaillierte Waldklassifizierungen, die flächenhafte Erfassung des Vitalitätszustandes von Waldbeständen und zur Kartierung von biotischen und abiotischen Schäden. Ein Nachteil bei stark strukturierten Wäldern stellt allerdings die geringe räumliche Auflösung von Landsat TM dar, so dass Daten von Ikonos eigentlich besser geeignet wären [KAHABKA 2000]. Hier entstehen dem Nutzer laut KAHABKA [2000] allerdings zu hohe Kosten und die Datenabdeckung für großräumige Anwendungen ist mangelhaft.

Bei Untersuchungen zur Erfassung des Waldzustands im Fichtel- und Erzgebirge stellten REUTHER et al. [1996] in einem Vergleich von verschiedenen Fernerkundungssensoren fest, dass sowohl multispektrale SPOT 1- und SPOT 2-Daten als auch Radardaten zur Waldschadenskartierung nicht geeignet sind.

Der Befliegungszeitpunkt zur Erfassung von Waldschäden ist abhängig von der Phänologie der Pflanzen, so können Waldschäden bei Nadelbäumen am besten von März bis Anfang Mai und von Juli bis Oktober, bei Laubbäumen von Juli bis Mitte September erkannt werden [HILDEBRANDT & PEERENBOOM 1984].

Für die Erfassung von Waldschäden sind nach COENRADIE [2003] CIR-Luftbilder gut geeignet. CIR-Luftbilder im Maßstabsbereich von 1:5.000 bis 1:10.000 zeigen strukturelle Veränderungen des Kronenzustandes und Veränderungen der spektralen Reflexion von Einzelbäumen, CIR-Luftbilder im Maßstabsbereich von 1:12.000 bis 1:20.000 eignen sich zur Abschätzung des Schadgrades ganzer Bestände [COENRADIE 2003].

Vorteile der Erfassung des Vitalitätszustandes von Wäldern mit Hilfe von Luftbildern sind nach RÖHLE & SCHMIDT [1987] der geringe Zeitaufwand, die zweifelsfreie Dokumentation der aktuellen Schadsituation und die Möglichkeit der erneuten Auswertung älterer Luftbilder in späteren Jahren. In CIR-Luftbildern im Maßstab von 1:3.000 bis 1:8.000 scheinen gesunde Bäume rot, kranke Bäume in verbläulichem Rot bis blau-grau und tote Bäume blau-grün bis grün [AMMER et al. 1983].

Für jede erfasste Baumkrone wird der Nadel- und Blattverlust (NBV) geschätzt, und in fünf 5%-Stufen von 0 bis 100 zusammengefasst. Parallel dazu wird die Vergilbung als prozentualer Anteil ersichtlich gelb verfärbter Blattorgane geschätzt und in vier Vergilbungsschadstufen zusammengefasst [MEINING et al. 2005]. In der Tabelle 22 ist die Schadstufeneinteilung nach Nadel- und Blattverlust und der Vergilbung dargestellt und Abbildung 13 zeigt die Schadstufendarstellung für die Buche im Farbinfrarotluftbild und aus terrestrischer Sicht.

Tabelle 22: Schadstufeneinteilung nach mittlerem Nadel- oder Blattverlust und Vergilbung [Quelle: MEINING et al. 2005, verändert]

Schadstufe	Beschreibung	NBV in %	Vergilbung in %
S1	nicht geschädigt	0 – 20	0 – 10
S2	schwach geschädigt	21 – 40	11 – 33
S3	mittelmäßig geschädigt	41 – 60	34 – 66
S4	stark geschädigt	61 – 80	67 – 100
S5	tot oder absterbend	81 – 100	



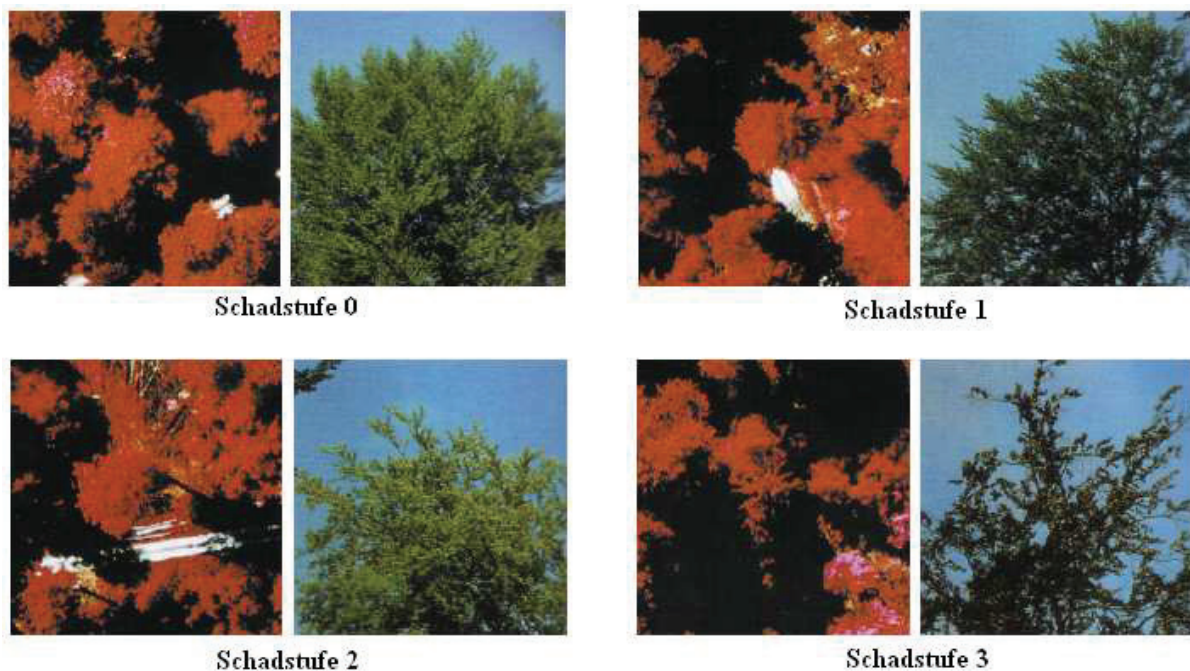


Abbildung 13: Schadstufendarstellung für die Buche im Farbinfrarotluftbild und aus terrestrischer Sicht [Quelle: ALBERTZ 2007, verändert]

#### 4.3 Anwendung der Fernerkundung zur Kartierung von Sturmschäden

Zur Kartierung der Schadensauswirkung nach dem Orkan Lothar im September 2006 haben KAHABKA et al. [2001] ein zweistufiges Kartierungsverfahren entwickelt. Hier werden nach COENRADIE [2003] Radardaten aufgrund ihrer Wetterunabhängigkeit für eine erste kurzfristige überregionale Groberfassung verwendet. Für eine anschließende mittelfristige genaue visuelle Kartierung von Sturmwurfflächen werden Daten hochauflösender optischer Satellitensysteme verwendet und mit vorhandenen Forstdaten verknüpft [COENRADIE 2003].

RAMMINGER [2004] fand in Untersuchungen heraus, dass Daten von Ikonos und SPOT 5 am besten für die Erfassung von Sturmschäden geeignet sind. Nachteilig ist allerdings, dass die Erfassung nur während der Vegetationsperiode möglich ist und dass die Sturmfläche bei Störgrößen wie Schnee und Wolken größer bzw. bei Schatten kleiner erscheint als sie wirklich ist [RAMMINGER 2004].

Für die Interpretation der Satellitenbilder können neben den visuellen Verfahren auch automatisierte Verfahren herangezogen werden. Visuelle Interpretationen von Ikonos- und SPOT 5-Daten sind für Sturmflächen mit einer Größe über vier Hektar mit einer Genauigkeit von über 90 % und bei Flächen mit einer Größe über einem Hektar mit einer Genauigkeit von über 80 % möglich [RAMMINGER 2004]. Die Genauigkeiten bei der automatisierten Interpretation sind nach RAMMINGER [2004] geringer. Der große Vorteil der visuellen Interpretation ist laut RAMMINGER [2004], dass hier die Vielfalt der Struktur-, Textur und Signaturinformation besser genutzt werden kann als bei automatisierten Verfahren, da diese vom menschlichen Auge besser wahrgenommen werden können als von Computern. Andererseits ist aber die automatisierte Interpretation kostengünstiger und vereinfacht und beschleunigt den Auswertungsprozess erheblich [RAMMINGER 2004]. Um die Vorteile beider Varianten zu nutzen, werden diese meistens in Kombination angewandt [RAMMINGER 2004].

Zur Erfassung von Sturmschäden können auch Luftbilder herangezogen werden. Diese müssen nach RAMMINGER [2004] eine Aufnahmefläche von mindestens zwei Hektar umfassen und spätestens vier bis sechs Wochen nach dem Ereignis für den Nutzer zur Verfügung stehen. Luftbilder enthalten mehr und genauere Informationen als Satellitenbilder beanspruchen, aber einen größeren Zeitaufwand für die Identifizierung der Schäden [RAMMINGER 2004].

#### **4.4 Erfassung von Waldbränden mit Hilfe der Fernerkundung**

Bei Bränden im Wald unterscheidet man nach STIFTUNG UNTERNEHMEN WALD [2006b] zwischen Erdfeuern (Schwelbrände im Boden, die unterirdische Organe der Bäume zerstören), Boden- oder Lauffeuern (Verbrennung der Streu und oberirdischer Teile der Pflanzen, die zur starken Auswaschung der mineralisierten Nährstoffe führen), Kronenfeuern (wenn Bodenfeuer in den Kronenbereich hochschlagen) und Vollfeuern (Kombination aus Boden- und Kronenfeuer, die zum Tod der betroffenen Bestände führen).

Für die Erkennung von Waldbränden durch Fernerkundung wird die Emission von Wärme im thermalen Infrarot genutzt, da in diesem Wellenlängenbereich so gut wie keine Absorption durch die Atmosphäre stattfindet [HILDEBRANDT et al. 1984].

Feuergefahr wird nach MYCKE-DOMINKO [2004] in die folgenden drei Klassen eingeteilt:

- Klasse 1 = große Feuergefahr
- Klasse 2 = mäßige Feuergefahr
- Klasse 3 = geringe Feuergefahr

Die Klassifikation der Feuergefahr kann mit Hilfe von Vegetationsindizes (NDVI, TNDVI), die aus Landsat TM-, Ikonos- oder NOAA-Daten abgeleitet werden, erfolgen, wobei Landsat TM-Daten nach MYCKE-DOMINKO [2004] am besten geeignet sind. Für Frühwarnsysteme sind die räumliche und zeitliche Auflösung allerdings nicht ausreichend [OESCH 2001].

Faktoren, die für die Klassifizierung herangezogen werden, sind Biomasse (Zustand, Quantität, Feuchtegehalt, horizontale und vertikale Struktur), Wetter (Relative Feuchte, Niederschlag, Temperatur), Topographie (Steilheit, Orientierung und Position im Untersuchungsgebiet, Höhe und Geomorphologie) [OESCH 2001] sowie die Häufigkeit von Waldbränden in der Vergangenheit (z.B. der letzten 5 Jahre) und die Luftverschmutzungsrate durch Industrieemissionen [MYCKE-DOMINKO 2004].

Aber auch der Bereich des sichtbaren Lichts und des mittleren Infrarot können zur Erfassung von aktiven Bränden herangezogen werden [OESCH 2001]. Sensoren können aktive Brände im sichtbaren Bereich nur nachts, im Bereich des thermalen oder mittleren Infrarot tags und nachts erfassen [OESCH 2001]. Die spektrale, räumliche und zeitliche Auflösung derzeit verfügbarer Systeme lassen laut OESCH [2001] eine Echtzeitüberwachung von Waldbränden nicht zu. NOAA, GOES, Meteosat etc. ermöglichen ein Brandmonitoring auf globaler Ebene, Landsat TM und SPOT erlauben ein Monitoring auf regionaler Ebene [OESCH 2001]. Zur Überwachung und Kartierung lokaler Feuerherde ist nach OESCH [2001] derzeit keine Sensorplattform vorhanden.

## **5. Zusammenfassung und Ausblick**

Die Fernerkundung kann in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte in Hinsicht auf Technologie, Datenverarbeitung und Informationsgewinnung verzeichnen [WULDER & FRANKLIN 2003] und auch in Zukunft wird sich die Fernerkundungstechnik ständig weiter fortentwickeln [CIHLAR et al. 2003].

Die Anwendung der optischen Fernerkundung in der Landwirtschaft erfordert eine sehr hohe räumliche Auflösung. Diese wird aber nur von wenigen Satellitensystemen wie Ikonos-2 oder QuickBird geboten. Ein akzeptables Ergebnis liefern zum Teil auch die panchromatischen Kanäle von SPOT und IRS (z.B. Untersuchung von Feldheterogenitäten). Die zeitliche Auflösung der Satelliten ist allerdings nicht optimal, und die schnelle Datenverfügbarkeit ist aufgrund der mehrere Wochen dauernden Vorprozessierung der Daten nicht erfüllbar [GRENZDÖRFFER 1998]. Die hochauflösenden Sensoren von Ikonos-2 und QuickBird haben allerdings nur sehr kleine Aufnahme Fenster und beanspruchen für die Nutzung in der Landwirtschaft zu hohe Kosten [VOß 2005]. Ein weiteres Defizit ist die Wetterabhängigkeit der Satelliten, so dass wolkenfreie Satellitenaufnahmen zum Beispiel nur an etwa 30 Tagen im Jahr möglich sind [GAF 1999], wodurch die notwendigen Daten nur eingeschränkt zur Verfügung stehen [JACOBI 2005]. Hier wären Radarsysteme von Vorteil, da diese wetterunabhängig und billiger sind als optische Systeme. Ein Nachteil ist hier allerdings die komplizierte Datenauswertung.

Um Witterungseinflüsse zu umgehen, hat sich auch die Anwendung der flugzeuggestützten Fernerkundung bewährt, da hier unterhalb der Wolken geflogen werden kann. Außerdem haben Flugzeugaufnahmen eine höhere räumliche Auflösung als Satellitenaufnahmen. Ein Defizit, das allerdings auch hier auftaucht, ist der Zeitverzug, mit dem die Aufnahmen dem Landwirt zur Nutzung zur Verfügung stehen, da diese aufbereitet werden müssen.

Für Anwendungen in der Landwirtschaft eignen sich auch bodengestützte Systeme wie LASSIE oder portable Systeme wie das HandySpec Field. Diese sind ebenfalls witterungsunabhängig und hochauflösend. Auch GPS-Systeme kommen für landwirtschaftliche Anwendungen (z.B. Precision Farming) zum Einsatz. Diese benötigen allerdings, um eine hohe Positionierungsgenauigkeit (im cm-Bereich) zu erlangen, die Unterstützung von DGPS-

Empfängern, die relativ teuer in der Anschaffung sind. Die GPS-Systeme helfen dem Landwirt aber bei der Ableitung teilflächenspezifischer Maßnahmen und tragen somit zur Einsparung von Betriebsmitteln bei, da Düngemittel und Pflanzenschutzmittel nur da ausgebracht werden, wo sie benötigt werden. Somit können die Anschaffungskosten des Systems wieder ausgeglichen werden.

Für die Anwendung der Fernerkundung in der Tierhaltung (Schweine) hat sich ein thermographisches Aufnahmesystem bewährt, das über eine thermographische Bildkamera die Tiere beobachtet und so Rückschlüsse auf den Gesundheitszustand der Tiere ermöglicht. Ansonsten werden zur Tierbeobachtung meistens Transponder und Sensoren verwendet, die direkt am Tier oder im Stall angebracht werden. Beim sogenannten Precision Livestock Farming können auf diese Weise Parameter der Futteraufnahme, des Tierverhaltens und der Tiergesundheit erfasst werden [SPRENG & AUERNHAMMER 2005].

In der Forstwirtschaft eignet sich Landsat MSS zur Klassifizierung von Wäldern. Hier konnten Klassifizierungsgenauigkeiten von 60 bis 70 % für die Einteilung in Wald und Nichtwald erreicht werden. Zur Erfassung von Waldschäden ist Landsat MSS aufgrund des geringen räumlichen und spektralen Auflösungsvermögens nur bedingt geeignet und wird somit zur Kartierung großflächiger Schäden herangezogen [COENRADIE 2003]. Landsat TM ist aufgrund seiner besseren radiometrischen, spektralen und geometrischen Auflösungen auch für detaillierte Waldklassifizierungen, die flächenhafte Erfassung des Vitalitätszustandes von Waldbeständen und zur Kartierung von biotischen und abiotischen Schäden geeignet [COENRADIE 2003]. Aber auch hier wird die räumliche Auflösung zum Problem, wenn die Wälder stark strukturiert sind. Eine Alternative wären Daten von Ikonos, aber diese verursachen beim Nutzer zu hohe Kosten und weisen eine mangelhafte Datenabdeckung für großräumige Anwendungen auf [KAHABKA 2000]. Multispektrale SPOT 1- und SPOT 2-Daten und Radardaten konnten bei der Kartierung von Waldschäden nicht überzeugen [REUTHER et al. 1996].

Bei der Erfassung von Sturmschäden haben sich Radardaten für eine erste Groberfassung qualifiziert [COENRADIE 2003]. Zur anschließenden mittelfristigen Kartierung der Schäden sind Daten von SPOT-5 und Ikonos am besten geeignet. Hier können bei der Interpretation

Genauigkeiten von 80 % (Flächen > 1ha) bis 90 % (Flächen > 4 ha) erreicht werden [RAM-MINGER 2004].

Der Befliegungszeitpunkt zur Erfassung von Waldschäden ist abhängig von der Phänologie der Pflanzen, so können Waldschäden bei Nadelbäumen am besten von März bis Anfang Mai und von Juli bis Oktober, bei Laubbäumen von Juli bis Mitte September erkannt werden [HILDEBRANDT & PEERENBOOM 1984]. Für die Erfassung von Wald- und Sturmschäden sind auch Luftbilder bestens geeignet.

Die Klassifikation der Waldbrandgefahr kann mit Hilfe von Landsat TM-, Ikonos- oder NOAA-Daten erfolgen, wobei Landsat TM-Daten am besten geeignet sind [MYCKE-DOMINKO 2004]. Für Frühwarnsysteme sind die räumliche und zeitliche Auflösung allerdings nicht ausreichend [OESCH 2001]. Auch eine Echtzeitüberwachung von Waldbränden ist mit den derzeit verfügbaren Satellitensystemen nicht möglich. Für ein Monitoring von Waldbränden eignen sich die Sensoren von NOAA, GOES, Meteosat etc. auf globaler Ebene sowie Landsat TM und SPOT auf regionaler Ebene [OESCH 2001]. Die Überwachung und Kartierung lokaler Feuerherde ist mit den derzeit verfügbaren Systemen nicht möglich [OESCH 2001].

Die Fernerkundung muss in Zukunft laut EUROPÄISCHER KOMMISSION [2007] drei wesentliche Forderungen erfüllen:

- ein höheres räumliches und spektrales Auflösungsvermögen
- eine höhere Schwenkbarkeit der Satelliten, um sie schneller auf ein bestimmtes Ziel auszurichten
- eine höhere Überflugrate (zeitliche Auflösung), um ein Ereignis tag aktuell verfolgen zu können

Diese Anforderungen können von dem Satellit WorldWiev-2 erfüllt werden, der laut DIGITAL GLOBE [2009] noch in diesem Jahr gestartet werden soll. WorldWiev-2 hat eine räumliche Auflösung von 50 cm im panchromatischen und von 1,8 m im multispektralen Bereich bei einer zeitlichen Auflösung von einem Tag [DIGITAL GLOBE 2009].

## 6. Literatur

- AGRAVIS Raiffeisen AG (2009) <http://www.agravis.de/landtechnik/gps/funktion.jsp>  
(letzter Zugriff: 20.01.2008)
- Akca, A., Hildebrandt, G., Huss, J., Kenneweg, H., Peerenboom, H.-G., Rhody, B. (1984):  
Anwendung der Fernerkundung in der Forstwirtschaft. In: Huss, J. (1984): Luftbild-  
messung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Wichmann, Karlsruhe,  
S. 248-370
- Albertz, J. (2007): Einführung in die Fernerkundung: Grundlagen der Interpretation von Luft-  
und Satellitenbildern. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- Althausen, J.D. (2002): What remote sensing system should be used to collect the data? In:  
Bossler J.D. (2002): Manual of Geospatial science and technology. Taylor and Francis,  
S. 276-297
- Ammer, U. Mössmer, R., Bröker, U. (1983): Beitrag der Fernerkundung zur Erfassung der  
Waldschäden  
<http://www.springerlink.com/content/140421n663740kk7/fulltext.pdf>  
(letzter Zugriff: 08.12.2008)
- Anhuf, D. (1997): Satellitenbildgestützte Vegetationsklassifikation der Cote d'Ivoire. In:  
Mannheimer Geographische Arbeiten, Heft 45.
- Antenucci, R., Antenucci, J. (2002): Private sector applications. In: J.D. (2002): Manual of  
Geospatial science and technology. Taylor and Francis, S. 608-616
- Asner, G.P., Hicke, J.A., Lobell, D.B. (2003): Pre-pixel analysis of forest structure Vegetation  
indices, spectral mixture analysis and canopy reflectance modeling. In: Wulder, M.A.,  
Franklin, S.E. (2003): Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Stu-  
dies. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, S. 209-254
- Bakker, W.H. (2001): Multispectral scanners. In: Jansen, L.L.F., Huurneman, G.C. (2001):  
Principles of Remote Sensing. ITC, Enschede, NL, S. 71-82
- Baldenhofer, K., Marschall, N. (2009): Das ENSO-Phänomen - Fernerkundung  
<http://www.enso.info/fernerkundung.html#anfang> (letzter Zugriff: 16.08.2008)
- BanaFair e.V. (1999): Mit Sack und Pack gegen den Feind im Feld.  
<http://www.banafair.de/publ/cuadernos/cuad5/sackpack.htm>  
(letzter Zugriff: 20.01.2009)
- Baret, F., Guyot, G., Major, D. (1989): TSAVI: a vegetation index which minimizes soil  
brightness effects on LAI and APAR estimation. In: Proceedings of 12th Canadian Sym-  
posium on Remote Sensing and IGARSS'89, Vancouver, Canada. Vol. 3,  
S. 1355-1358

- Belward, A.S. (1991a): Spectral characteristics of vegetation, soil and water in visible, near infrared and middle-infrared wavelengths. In: Belward, A.S., Valenzuela, C.R. (1991): Remote sensing and geographical Information systems for resource management in developing countries, Springer Verlag, S. 31-53
- Belward, A.S. (1991b): Remote Sensing For Vegetation Monitoring On Regional And Global Scales. In: Belward, A.S., Valenzuela, C.R. (1991): Remote sensing and geographical Information systems for resource management in developing countries, Springer Verlag, S. 169-187
- Bergfeld, U. (2006): Precision Dairy Farming – ein Schlagwort oder Basis zukunftsfähiger Milchproduktion? Baulehrschau-Fachtag am 6.12.2006.  
[http://www.smul.sachsen.de/lfulg/download/Vortrag\\_BLS\\_Fachtag\\_6\\_12\\_2006\\_Bergfeld.pdf](http://www.smul.sachsen.de/lfulg/download/Vortrag_BLS_Fachtag_6_12_2006_Bergfeld.pdf)  
(letzter Zugriff: 27.01.2009)
- Blaschka, A. (2003): Fernerkundung und GIS - Zukunftsperspektiven in der Landwirtschaft. 9. Alpenländisches Expertenforum, 27. - 28. März 2003. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding.  
[www.raumberg-gumpenstein.at/cms/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=399&Itemid=53](http://www.raumberg-gumpenstein.at/cms/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=399&Itemid=53) (letzter Zugriff: 08.07.2008)
- BMELV Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2006): Die EU-Agrarreform – Umsetzung in Deutschland.  
[http://www.bmelv.de/cln\\_045/nn\\_750578/SharedDocs/downloads/01-Broschueren/eu-agrarreform2006,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/eu-agrarreform2006\\_.pdf](http://www.bmelv.de/cln_045/nn_750578/SharedDocs/downloads/01-Broschueren/eu-agrarreform2006,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/eu-agrarreform2006_.pdf)  
(letzter Zugriff: 24.10.2008)
- BMELV Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2008b): Leichte Erholung für den deutschen Wald  
[http://www.bmelv.de/cln\\_044/nn\\_754188/DE/06-Forstwirtschaft/Waldberichte/Waldzustand2007.html\\_nnn=true](http://www.bmelv.de/cln_044/nn_754188/DE/06-Forstwirtschaft/Waldberichte/Waldzustand2007.html_nnn=true)  
(letzter Zugriff: 05.11.2008)
- Böhme, B. (2003): Überwachung von Agrarbrachen mittels remote sensing. Seminar Grundwasserschutz. Freiberg.  
[http://www.geo.tu-freiberg.de/hydro/vorl\\_portal/gw-schutz/seminarvotr%E4ge/fl%E4chenstillegung.pdf](http://www.geo.tu-freiberg.de/hydro/vorl_portal/gw-schutz/seminarvotr%E4ge/fl%E4chenstillegung.pdf) (letzter Zugriff: 08.12.2008)
- Borg, E., Klisch, A. (2006): Fernerkundung für die Landwirtschaft. DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., DFD Deutsches Fernerkundungsdatenzentrum, Neustrelitz.  
<http://www.dlr.de/caf/Portaldata/36/Resources/dokumente/forschung/2.pdf>  
(letzter Zugriff: 15.11.2008)



- Brandes, D., Etzensperger, Ch. (2008): EU-Agrarfreihandel: Weichen jetzt stellen! Research News. Credit Suisse Economic Research.  
[http://emagazine.credit-suisse.com/app/\\_customtags/download\\_tracker.cfm?logged=true&dom=emagazine.creditsuisse.com&doc=/data/\\_product\\_documents/articles/224809/Research%20News%20Agrarfreihandel%20\(2\).pdf&CFID=49826406&CFTOKEN=e46134b442f5d5af-89B4DF11-1125-9D9D-302464001F596F59](http://emagazine.credit-suisse.com/app/_customtags/download_tracker.cfm?logged=true&dom=emagazine.creditsuisse.com&doc=/data/_product_documents/articles/224809/Research%20News%20Agrarfreihandel%20(2).pdf&CFID=49826406&CFTOKEN=e46134b442f5d5af-89B4DF11-1125-9D9D-302464001F596F59)  
(letzter Zugriff: 14.10.2008)
- Broge, N.H., Leblanc, E. (2000): Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 76, S. 156-172
- BVL Bundesministerium für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (2005): Tierarzneimittelrückstände in Lebensmitteln.  
[http://www.bvl.bund.de/DE/05\\_Tierarzneimittel/02\\_RueckstInLm/rueckst\\_LM\\_node.html](http://www.bvl.bund.de/DE/05_Tierarzneimittel/02_RueckstInLm/rueckst_LM_node.html) (letzter Zugriff: 03.02.2009)
- Casaca, P., McCartin, J.J., Mulder, J. (1003): Arbeitsdokument über das Kontrollsystem für die Landwirtschaft (InVeKoS).Entlastung 2001. Ausschuss für Haushaltskontrolle, Europäisches Parlament.  
<http://www.europarl.europa.eu/meetdocs/committees/cont/20030121/463118DE.PDF>  
(letzter Zugriff: 20.01.2009)
- Cihlar, J. Latifovic, R., Beaubien, J., Trishchenko, A., Chen, J., Fedosejevs, G. (2003): National scale forest information extraction from coarse resolution satellite data, part 1. Data processing and mapping land cover types. In: Wulder, M.A., Franklin, S.E. (2003): Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, S. 337-357
- Coenradie, B. (2003): Waldzustandserfassung und –monitoring mit hochauflösenden Satellitenbilddaten.  
[http://edocs.tu-berlin.de/diss/2003/coenradie\\_bodo.pdf](http://edocs.tu-berlin.de/diss/2003/coenradie_bodo.pdf)  
(letzter Zugriff: 18.11.2008)
- Czisch, N., Tuttenuj, D. (2008): Vegetationsindices und Multitemporale Bildauswertung in der Fernerkundung. Seminar Fernerkundung.  
[http://www.geographie.uni-tuebingen.de/fileadmin/downloads/studium/lehrveranstaltungen/SS2008/Rosner/fe2008\\_11\\_vegetationsindices.pdf](http://www.geographie.uni-tuebingen.de/fileadmin/downloads/studium/lehrveranstaltungen/SS2008/Rosner/fe2008_11_vegetationsindices.pdf)  
(letzter Zugriff: 08.12.2008)
- de Lange, N. (2002): Geoinformatik in Theorie und Praxis. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Deutscher Bundestag (2007): Antwort der Bundesregierung auf die Kleine Anfrage der Abgeordneten Cornelia Behm, Ulrike Höfken, Bärbel Höhn, weiterer Abgeordneter und der Fraktion BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN. Erhaltung der landwirtschaftlichen Nutzflächen in einem guten landwirtschaftlichen und ökologischen Zustand. Drucksache 16/5704  
<http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/16/058/1605886.pdf> (letzter Zugriff: 21.01.2009)

Deutscher Bundestag (2006): Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technikfolgenabschätzung (TA). TA-Projekt: Moderne Agrartechniken und Produktionsmethoden – ökonomische und ökologische Potenziale. 2. Bericht: Precision Agriculture. Drucksache 16/3218.

<http://dip21.bundestag.de/dip21/btd/16/032/1603218.pdf> (letzter Zugriff: 24.10.2008)

Dicke, D., Jacobi, J. (2007): Quantifizierung der Vitalität von Mais nach Behandlung mit Herbiziden anhand fernerkundlicher Daten. In: Herrmann, A., Taube, F. (2007): 50 Jahre Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften – Rückblick und Perspektiven für die Zukunft, Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften, Band 19. Verlag Schmidt & Klaunig KG. Kiel, S. 218-219

[http://www.gpw.uni-bonn.de/pdf/publikation/Tagungsband%202007\\_Homepage.pdf](http://www.gpw.uni-bonn.de/pdf/publikation/Tagungsband%202007_Homepage.pdf) (letzter Zugriff: 24.10.2008)

DigitalGlobe Inc. (2009)

<http://www.digitalglobe.com/index.php/82/Content+Collection+Systems>

(letzter Zugriff: 20.02.2009)

Dixon, J., McCann, M. (1997): Precision Agriculture in the 21st century. Geospatial and information technologies in crop management. National Academic Press, Washington DC.

DLG Deutsche Landwirtschafts-Gesellschaft (2007): DLG Merkblatt 338: Datenerfassung – Notwendigkeit und Chance. DLG e.V. Frankfurt am Main.

[http://www.dlg.org/uploads/media/dlg-merkblatt\\_338\\_02.pdf](http://www.dlg.org/uploads/media/dlg-merkblatt_338_02.pdf)

(letzter Zugriff: 28.10.2008)

DLR Deutsches Zentrum für Luft und Raumfahrt (2002): SCIAMACHY auf ENVISAT. Ein Atmosphärensensor der neuen Generation.

[http://www.dlr.de/rd/Portaldata/28/Resources/dokumente/eo/sciamachy\\_dt.pdf](http://www.dlr.de/rd/Portaldata/28/Resources/dokumente/eo/sciamachy_dt.pdf)

(letzter Zugriff: 05.02.2009)

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2007): TerraSAR-X - Deutscher Radarsatellit erfolgreich gestartet.

[http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-1/86\\_read-9475/](http://www.dlr.de/desktopdefault.aspx/tabid-1/86_read-9475/)

(letzter Zugriff: 20.01.2009)

DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (2009): Fernerkundung für die Landwirtschaft.

[http://www.dlr.de/caf/desktopdefault.aspx/tabid-2627//3928\\_read-5825](http://www.dlr.de/caf/desktopdefault.aspx/tabid-2627//3928_read-5825)

(letzter Zugriff: 24.10.2008)

Doluschitz, R., Kunisch, M. (2004): agroXML - ein standardisiertes Datenformat für den Informationsfluss entlang der Produktions- und Lieferkette. Zeitschrift für Agrarinformatik 4/04.

[http://www.gil.de/publications/zai/archiv/R8\\_20040013.pdf](http://www.gil.de/publications/zai/archiv/R8_20040013.pdf)

(letzter Zugriff: 05.11.2008)

- Dohmen, B. (2004): Digitale Infrarotluftbilder (NIR). In: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. (2004): Precision Farming Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL, S. 3.2-51 – 3.2-54
- Doluschitz, R., Engler, B. (2008): Rückverfolgbarkeit von Lebensmitteln tierischer Herkunft. Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft e.V. (GIL). [http://oega.boku.ac.at/fileadmin/user\\_upload/Tagung/2008/Short\\_Paper\\_2008/Doluschitz\\_Engler\\_OEGA2008\\_Tagungsband.pdf](http://oega.boku.ac.at/fileadmin/user_upload/Tagung/2008/Short_Paper_2008/Doluschitz_Engler_OEGA2008_Tagungsband.pdf) (letzter Zugriff: 18.11.2008)
- Ebel, M., Graff, M. (1994): Die Satellitendüngung kann sich rechnen, DLG-Mitteilungen. Heft 8/1994.
- Ehlert, D., Wagner, N. (1997): Schluss mit dem Gießkannenprinzip – Positive Aspekte beim Umweltschutz. In: Per Satellit Erträge steigern: Kosten senken, Arbeit optimieren, Umwelt schützen, Daten verarbeiten. BLV-Verlagsgesellschaft, München, S. 24-27
- Eiden, G., Dreiser, C., Gesell, G., König, T. (1991): Large Scale Monitoring of Rangeland Vegetation Using NOAA/11 AVHRR LAC Data: application to the rainy seasons 1989/90 in Northern Kenya / GTZ, Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit. Range Management Handbook of Kenya, Vol. 3/4, Nairobi, Oberpfaffenhofen.
- Eklundh, L. (1998): Estimating relations between AVHRR NDVI and rainfall in East Africa at 10-day and monthly time scales. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, S. 563-570
- Engel, T. (2006): Nutzungsstand und Nutzungsperspektiven von Informations- und Kommunikationstechnik bei Landmaschinen. [http://www.gil.de/dokumente/berichte/DDD/R9\\_20010006.pdf](http://www.gil.de/dokumente/berichte/DDD/R9_20010006.pdf) (letzter Zugriff: 30.01.2009)
- Europäische Kommission (2007): Satelliten – Kunstwerk Erde. research\*eu Spezial Satelliten, September 2007. research\*eu, Magazin des Europäischen Forschungsraums. [http://ec.europa.eu/research/research-eu/pdf/research\\_eu\\_sat\\_de.pdf](http://ec.europa.eu/research/research-eu/pdf/research_eu_sat_de.pdf) (letzter Zugriff: 21.03.2009)
- Feller, C., Fink, M., Laber, H., Maync, A., Paschold, P.-J., Scharpf, H.-Ch., Schlaghecken, J., Strohmeyer, K., Weier U., Ziegler J.(2007): Düngung im Freilandgemüsebau - Datenbasis für eine erfolgreiche Düngung im Freilandgemüsebau. 2. überarbeitete Auflage. Schriftenreihe des Institutes für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren und Erfurt. Ein Institut der Leibniz-Gemeinschaft. [http://www.igzev.de/user/N-Expert/Gesamt\\_Text\\_Duengung\\_1406.pdf](http://www.igzev.de/user/N-Expert/Gesamt_Text_Duengung_1406.pdf) (letzter Zugriff: 05.02.2009)
- Franklin, S.E. (2001): Remote Sensing for Sustainable Forest Management. Lewis Publishers, CRC Press LLC, Boca Raton, Florida.

- Frauenholz, D., Gröger, V., v. Haaren, Ch., Schweres, M. (2000): Veranschaulichung der Umweltwirkungen landwirtschaftlicher Betriebe – Konzeption und Anwendungsmöglichkeiten eines computergestützten Verfahrens. Zeitschrift für Agrarinformatik 4/00. [http://www.gil.de/publications/zai/archiv/R8\\_20000021.pdf](http://www.gil.de/publications/zai/archiv/R8_20000021.pdf) (letzter Zugriff: 05.11.2008)
- Franklin, J., Rhinn, S.R., Woodcock, C.E., Rogan, J. (2003): Rationale an conceptual framework for classification approaches to access forest resources and properties. In: Wulder, M.A., Franklin, S.E. (2003): Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, S. 279-300
- Fröhlich, G., Thurner, S., Böck, S., Weinfurtner, R., Wendl, G. (2007): Elektronisches Identifikationssystem zur Erfassung des Verhaltens von Legehennen. eZAI (2) 1/2007, Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft e.V. (GIL) <http://www.preagro.de/ezai/index.php/eZAI/article/view/18/18> (letzter Zugriff: 05.11.2008)
- GAF Gesellschaft für Angewandte Fernerkundung mbH (1999): Satellitenbildfernerkundung zur Managementunterstützung landwirtschaftlicher Betriebe. Ermittlung landwirtschaftlicher Bedarfspotentiale für hochauflösende optische Satellitenfernerkundungsdaten (SPOT/MOMS/IRS-1C) im Hinblick auf betriebsindividuelle Managementunterstützung für DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR). <http://edok01.tib.uni-han-nover.de/edoks/e001/310245222.pdf> (letzter Zugriff: 25.11.2008)
- Gebbers, R. Lück, E. (2004): Messung des Durchdringungswiderstands und der elektrischen Leitfähigkeit mit dem Veris® Profiler 3000. In: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. (2004): Precision Farming Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL, S. 3.2.3-97 – 3.2.3-135
- Gong, P., Xu, B. (2003): Remote sensing of forests over time: change types, methods and opportunities. In: Wulder, M.A., Franklin, S.E. (2003): Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, S. 301-333
- Grenzdörffer, G. (1998): Dokumentation und Analyse kleinräumiger Heterogenität mit Fernerkundung und GIS. In: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität: KTBL/ATB Workshop vom 15.-16. Januar 1998 in Potsdam. KTBL Arbeitspapier 264, S. 93-105
- Grenzdörffer, G., Korduan, P., und Vatterrott, H.-R. (2000): Entwicklung eines internetbasierten Recherchertools für Fernerkundungsdaten. Institut für Geodäsie und Geoinformatik, Universität Rostock. [http://www.preagro.de/Ergebnisse/FE\\_Recherche.pdf](http://www.preagro.de/Ergebnisse/FE_Recherche.pdf) (letzter Zugriff: 12.08.2008)
- Grenzdörffer G. (2004): Hochgenaue digitale Luftbilder. In: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. (2004): Precision Farming Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL, S. 3.2-45 – 3.2-49

- Haberäcker, P., Kirchhof, W., Krauth, E., Kritikos, G., Winter, R., Schramm, M., Sosnowski, H. (1979): Auswertung von Satellitenaufnahmen zur Gewinnung von Flächenutzungsdaten. Schriftenreihe „Raumordnung“ des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, 06.039, Bad Godesberg
- Helms, I. (2006): Gülle mit Nebenwirkungen Reste von Tierarzneimitteln können eine Gefahr für die Umwelt sein. TU Berlin  
<http://www2.tu-berlin.de/presse/tui/06mai/guelle.htm> (letzter Zugriff: 03.02.2009)
- Herbst, R., Lamp, J. (1998): Zur kleinräumigen Heterogenität der Böden Deutschlands und zum Akzeptanzpotential der Teilflächenbewirtschaftung. In: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität: KTBL/ATB Workshop vom 15.-16. Januar 1998 in Potsdam. KTBL Arbeitspapier 264, S. 33-41
- Hessel, E. F., Van Den Weghe, H. F. (2008): Gewichtsermittlung von Mastschweinen mit Hilfe der digitalen Bildanalyse. In: Bericht über die KTBL-Tagung zum Thema „Precision Pig Farming“. Bildungs- und Wissenszentrum Boxberg - Schweinehaltung, Schweinezucht - Landesanstalt für Schweinezucht (LSZ).  
[http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1232315\\_11/LSZ\\_KTBL%20Tagung%20Teil%201.pdf](http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1232315_11/LSZ_KTBL%20Tagung%20Teil%201.pdf) (letzter Zugriff: 27.01.2009)
- Hildebrandt, G., Huss, J., Kenneweg, H. (1984): Physikalische und Technologische Grundlagen der Fernerkundung. In: Huss, J. (1984): Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Wichmann, Karlsruhe, S. 18-83
- Hildebrandt, G., Peerenboom, H.-G.(1984): Wirtschaftliche und organisatorische Fragen zur Fernerkundung. In: Huss, J. (1984): Luftbildmessung und Fernerkundung in der Forstwirtschaft. Wichmann, Karlsruhe, S. 233-247
- Hildebrandt, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Wichmann, Karlsruhe.
- Hinck, H.-H. (2001): Kennzeichnung, Pass und Datenbank für Rinder!  
<http://www.hhhinck.de/bauer/Pass/pass.html> (letzter Zugriff: 20.01.2009)
- Hirschfeld, J, Weiß, J., Preidl, M., Korbun, Th. (2008):Klimawirkungen der Landwirtschaft in Deutschland, Diskussionspapier des IÖW  
[http://www.foodwatch.de/foodwatch/content/e10/e17197/e17201/e17220/IOEW\\_Klimawirkungen\\_der\\_Landwirtschaft\\_SR\\_186\\_08\\_ger.pdf](http://www.foodwatch.de/foodwatch/content/e10/e17197/e17201/e17220/IOEW_Klimawirkungen_der_Landwirtschaft_SR_186_08_ger.pdf)  
(letzter Zugriff: 14.10.2008)
- Hofer, M. (2009):Untersuchung von Lebensmittelproben - Chemische Abteilung.  
<http://www.magwien.gv.at/lebensmittel/untersuchung/chemie.html>  
(letzter Zugriff: 05.02.2009)
- Howard, J.A. (1991): Remote Sensing of Forest Resources – Theory and Application. Chapman & Hall, London.

- Huete, A.R., Justice, C., Liu, H. (1994): Development of Vegetation and Soil Indices for MODIS- EOS. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 49, S. 224-234
- Huete, A.R., Justice, C., Van Leeuwen, W. (1999): Modis Vegetation Index (MOD 13). Algorithm Theoretical Basis Document, Version 3.  
[http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd\\_mod13.pdf](http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf) (letzter Zugriff: 20.01.2009)
- Hufnagel, J. (2004): Planung und Umsetzung von Precision Farming auf dem Betrieb. In: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. (2004): Precision Farming Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL, S. 2-1 – 2-32
- Hurnik, D., Ireland, W.P., Stahlbaum, B.W., Dawson, W.E. (1995): Remote Thermographic Sensing of Livestock. University of Prince Edward Island, Canada. United States Patent Number 5474085.  
<http://www.patentstorm.us/patents/5474085/fulltext.html>  
(letzter Zugriff: 17.01.2009)
- Hüter, J., Kloepfer, F., Klöble, U. (2005): Elektronik, Satelliten und Co – Precision Farming in der Praxis. KTBL, Darmstadt.
- IVA Industrieverband Agrar e.V. (2006): Pflanzenschutz in der landwirtschaftlichen Praxis. Pflanzenschutz in der landwirtschaftlichen Praxis. Arbeitsblatt der Unterrichtsreihe Mensch & Umwelt. Themenblatt 8.  
[www.profil.iva.de/html/go.php?id=36&part=pub\\_download&url=../pics/AB-8\\_Pflanzenschutz.pdf](http://www.profil.iva.de/html/go.php?id=36&part=pub_download&url=../pics/AB-8_Pflanzenschutz.pdf) (letzter Zugriff: 15.11.2008)
- Jacob, A., Kirn, S. (2008): Eine Sensorarchitektur für Situationserkennung auf Lebedtiertransporten. eZAI(3), Gesellschaft für Informatik in der Land-, Forst- und Ernährungswirtschaft e.V. (GIL). <http://www.preagro.de/ezai/index.php/eZAI/article/view/50/40>  
(letzter Zugriff: 03.01.2009)
- Jacobi, J. (2005): Teilflächige Diagnose von Pilzbefall und Stickstoffmangel an Weizen mit Hilfe der optischen Fernerkundung. Dissertation an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn  
[http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=976610299&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=976610299.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=976610299&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=976610299.pdf) (letzter Zugriff: 15.12.2008)
- Jansen, L.L.F. (2001): Introduction to remote sensing. In: Jansen, L.L.F., Huurneman, G.C. (2001): Principles of Remote Sensing. ITC, Enschede, NL, S. 16-26
- JAXA Japan Aerospace Exploration Agency (2009)  
[http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/experience/rm\\_kiso/mecha\\_howto\\_e.html](http://www.eorc.jaxa.jp/hatoyama/experience/rm_kiso/mecha_howto_e.html)  
(letzter Zugriff: 20.02.2009)
- Ji, M. (2002): The remote sensing process: how do we collect the required in situ and remotely sensed data? In: Bossler J.D. (2002): Manual of Geospatial science and technology. Taylor and Francis, S. 253-275

- Jungbluth, T. Büscher, W., Krause, M. (2005): Technik Tierhaltung. Grundwissen Bachelor. Technik Tierhaltung UTB. Ulmer Verlag.
- Jürgens, C. (1997): The modified normalized difference vegetation index (mNDVI) - a new index to determine frost damages in agriculture based on LANDSAT TM data. In: International Journal of Remote Sensing. Taylor and Francis, S. 3583-3594
- Jürschik, P. (1998): Grundlagen der Anwendung von Fernerkundungsmethoden für die teilflächenspezifische Bewirtschaftung. In: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität, KTBL/ATBWorkshop vom 15.-16. Januar 1998 in Potsdam, S. 82-92
- Kahabka, H.(2000): Erfassung von neuartigen Waldschäden mit Landsat TM Satellitenbildern auf Basis eines bestehenden Stichprobennetzes - Eine exemplarische Untersuchung an der Baumart Fichte im Schwarzwald. Dissertation an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau.  
[http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=961155884&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=961155884.pdf](http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=961155884&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=961155884.pdf) (letzter Zugriff: 08.12.2008)
- Kahabka, H., Ramminger, G., Saidani, N., Dees, M., Koch, B. (2001): Schadenserfassung nach Orkan "Lothar" mit Methoden der Fernerkundung. AFZ - Der Wald, 56. Jg., Heft 25, S. 1331-1334
- Katsaras, N. (2004): Weltweite Marktumfeldanalyse zum Einsatz von Satellitensystemen zur Unterstützung der Entscheidungsfindung bei ökologisch orientierter Nutzung von Agrarlandschaften.  
<http://141.20.116.70/diplom/Katsaras.pdf> (letzter Zugriff: 24.10.2008)
- Keller, T. (2002): Auswirkungen von Landnutzungsänderungen auf das regionale Klima in Nordrhein – Westfalen, Dissertation an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.  
[http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=967220106&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=967220106.pdf](http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=967220106&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=967220106.pdf)
- Klenke, M. (1999): GIS-gestützte Landnutzungsklassifikationen auf Grundlage von Daten passiver und aktiver Fernerkundungssensoren zur distributiven Flusseinzugsgebietsmodellierung  
<http://epic.awi.de/Publications/Kle1999b.pdf>
- Knickmeyer, E.T. (2003): Einführung in die Navigation für GeoinformatikerInnen und VermesserInnen. Schriftenreihe der Fachhochschule Neubrandenburg. Reihe B: Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen. Bd. 6.
- Konecny, G. (2003): Geoinformation – Remote Sensing, Photogrammetry and Geographic Information Systems. Taylor and Francis.

- Klisch, A. (2003): Ableitung von Blattflächenindex und Bedeckungsgrad aus Fernerkundungsdaten für das Erosionsmodell EROSION 3D. Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Universität Potsdam. [http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=972190724&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=972190724.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=972190724&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=972190724.pdf) (letzter Zugriff: 15.11.2008)
- Kloepfer, F. (2004): Technik für Precision Farming. In: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. (2004): Precision Farming Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL, S. 3.1-1 – 3.1-23
- Knauer (2004): RF-10 AXL Fluoreszenz Detektor. Knauer GmbH, Berlin. [http://www.knauer.net/dwnld/fls/b\\_g\\_dt/fluorescence\\_rf-10\\_axl.pdf](http://www.knauer.net/dwnld/fls/b_g_dt/fluorescence_rf-10_axl.pdf) (letzter Zugriff: 03.02.2009)
- Konradowitz, S. (2006): Remote Sensing in der Hydrologie. Fachabteilung für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Christian Albrechts Universität Kiel. Seminar Wasserwirtschaft WS 05/06. [http://www.hydrology.uni-kiel.de/lehre/seminar/ws05-06/konradowitz\\_remote\\_sensing.pdf](http://www.hydrology.uni-kiel.de/lehre/seminar/ws05-06/konradowitz_remote_sensing.pdf) (letzter Zugriff: 08.01.2009)
- Koukal, T. (2001): Landschaftserfassung mit Luftbildern und Satellitenbildern. Tagung für die Jägerschaft, 13. und 14. Februar 2001. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein, Irnding. [www.raumberg-gumpenstein.at/cms/index.php?option=com\\_docman&task=doc\\_download&gid=202&Itemid=53](http://www.raumberg-gumpenstein.at/cms/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=202&Itemid=53) (letzter Zugriff: 08.07.2008)
- Lafsky, M.A., Cohen, W.B. (2003): Selection of remotely sensed data. In: Wulder, M.A., Franklin, S.E. (2003): Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, S. 13-46
- Lamp, J., Capelle, A., Ehlert, D., Jürschik, P., Kloepfer, F., Nordmeyer, H., Schröder, D., Werner, A. (1998): Erfassung der kleinräumigen Heterogenität in der teilflächenspezifischen Pflanzenproduktion. In: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität: KTBL/ATB Workshop vom 15.-16. Januar 1998 in Potsdam. KTBL Arbeitspapier 264, S. 7-32
- Leiterer, M. (2007): Entwicklungstrends in der modernen landwirtschaftlichen Analytik, Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft <http://www.landwirtschaft.sachsen.de/de/wu/Landwirtschaft/lfl/inhalt/download/leiterer.pdf> (letzter Zugriff: 18.11.2008)
- LfL Institut für Landtechnik, Bauwesen und Umwelttechnik (2004): Elektronische Tierkennzeichnung und molekulare Marker für die Verbesserung der Rückverfolgbarkeit von Tieren und Fleisch. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2004): Jahresbericht 2003. Arbeitsbereich „Verfahrenstechnik in der Nutztierhaltung“ (ILT 2). Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising-Weihenstephan. <http://www.lfl.bayern.de/publikationen/ilt/jahresbericht/07130/ILT-Jahresbericht2003-2.pdf> (letzter Zugriff: 05.02.2009)



- Lilienthal, H. (2003): Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems für die Landwirtschaft, Landbauforschung Völkenrode Sonderheft 254, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL), Braunschweig  
[http://literatur.fal.de/fallitdok\\_extern/zi030987.pdf](http://literatur.fal.de/fallitdok_extern/zi030987.pdf) (letzter Zugriff: 18.11.2008)
- Lilienthal, H., Schnug, E. (2003): Entwicklung eines bodengestützten Fernerkundungssystems zur Dauerbeobachtung landwirtschaftlicher Flächen. In: Jahresbericht der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) 2003. Bericht des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde.  
[http://www.fal.de/nm\\_787874/SharedDocs/01\\_PB/DE/Downloads/Jahresberichte/downloads-jahresbericht03,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/downloads-jahresbericht03.pdf](http://www.fal.de/nm_787874/SharedDocs/01_PB/DE/Downloads/Jahresberichte/downloads-jahresbericht03,templateId=raw,property=publicationFile.pdf/downloads-jahresbericht03.pdf) (letzter Zugriff: 08.12.2008)
- Maniak, S.(2004): Datenaustausch in Geographischen Informationssystemen. Shaker Verlag, Aachen.
- Meining, S., von Wilpert, K., Schröter, H. (2005):Waldzustandsbericht 2005 der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.  
<http://www.fva-bw.de/publikationen/wzb/ws2005.pdf> (letzter Zugriff: 21.03.2009)
- Menge, M. (2005): Umweltgerechte Landwirtschaft 2004, Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft  
[http://www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen/download/1689\\_4.pdf](http://www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen/download/1689_4.pdf)  
(letzter Zugriff: 15.10.2008)
- MLR Ministerium für Ernährung und Ländlichen Raum (2008): Dienstanweisung des Ministeriums für Ernährung und Ländlichen Raum Baden-Württemberg für die Durchführung der Feldbestandsprüfung bei Getreide (inkl. Mais), Gräser, Leguminosen, Öl- und Faserpflanzen sowie Kartoffeln am 02.04.2008.  
Az.: 23-8231.20.  
[www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1073472/lufa\\_Dienstanweisung%20Feldbesichtigung.pdf](http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1073472/lufa_Dienstanweisung%20Feldbesichtigung.pdf) (letzter Zugriff: 05.02.2008)
- Muhr, T. (1997): USA als Trendsetter – Technik und Beratung als Paket. In: Per Satellit Erträge steigern: Kosten senken, Arbeit optimieren, Umwelt schützen, Daten verarbeiten. BLV-Verlagsgesellschaft, München, S. 17-20
- NASA National Aeronautics and Space Administration (2009)  
[http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/Images/ndvi\\_example.jpg](http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/Images/ndvi_example.jpg) (letzter Zugriff: 20.01.2008)
- Niemeyer, I (2008): Physikalische Grundlagen der Fernerkundung. Institut für Markscheidewesen und Geodäsie. Technischen Universität Bergakademie Freiberg.  
[http://tu-freiberg.de/fakult3/mage/geomonitoring/education/ss2008/slides/fe1\\_ss2008\\_2.pdf](http://tu-freiberg.de/fakult3/mage/geomonitoring/education/ss2008/slides/fe1_ss2008_2.pdf) (letzter Zugriff: 08.01.2009)

- NIVR Nederlands Instituut voor Vliegtuigontwikkeling en Ruimtevaart: Scanning Imaging Absorption Spectrometer for Atmospheric Cartography (2009)  
<http://www.nivr.nl/scanning-imaging-absorption-spectrometer-for-atmospheric-cartography-sciamachy--224.html> (letzter Zugriff: 05.02.2009)
- Oesch, D. (2001): Fernerkundung und Naturgefahren - Methoden für Risk / Disaster Management und Humanitäre Einsätze. Bericht der Gruppe für Fernerkundung der Universität Bern.  
[http://saturn.unibe.ch/rsbern/publication/fulltext/deza\\_bericht/bericht\\_DEZA\\_WWW/DEZA\\_print.pdf](http://saturn.unibe.ch/rsbern/publication/fulltext/deza_bericht/bericht_DEZA_WWW/DEZA_print.pdf) (letzter Zugriff: 03.01.2009)
- Pache, S. (2007): Technologie für die Zukunft: Precision Dairy Farming – Präzise Milchkühhaltung. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. Fachbereich Tierische Erzeugung. Fachinformationen zur Tierhaltung.  
[http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/3236\\_1.pdf](http://www.smul.sachsen.de/lfl/publikationen/download/3236_1.pdf)  
(letzter Zugriff: 27.01.2009)
- Pappenheimer, M. (2007): Die Geschichte der Fernerkundung. Otto-Friedrich-Universität Bamberg. Lehrstuhl für Geographie II. Seminar: Fernerkundung. Sommersemester 2007.  
[http://www.uni-bamberg.de/fileadmin/uni/fakultaeten/ggeo\\_lehrstuehle/geographie\\_1/SS07/SchuettemeyerDirk/PappenheimerMerlin.pdf](http://www.uni-bamberg.de/fileadmin/uni/fakultaeten/ggeo_lehrstuehle/geographie_1/SS07/SchuettemeyerDirk/PappenheimerMerlin.pdf) (letzter Zugriff: 17.01.2009)
- Patil, V., Schnug, E., Lilienthal, H., Petkar, M. (2004): Fernerkundung von Stickstoffmangel in Mais In: Jahresbericht der Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft (FAL) 2004. Bericht des Instituts für Pflanzenernährung und Bodenkunde.  
[http://www.fal.de/nm\\_787874/SharedDocs/01\\_PB/DE/Downloads/Jahresberichte/downloads-jahresbericht04.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/downloads-jahresbericht04.pdf](http://www.fal.de/nm_787874/SharedDocs/01_PB/DE/Downloads/Jahresberichte/downloads-jahresbericht04.templateId=raw.property=publicationFile.pdf/downloads-jahresbericht04.pdf) (letzter Zugriff: 08.01.2009)
- pre agro (2001): pre agro - Managementsystem für den ortsspezifischen Pflanzenbau. Fernerkundung. Verbundprojekt pre agro.  
[http://www.preagro.de/preagro\\_mops/Infomappe2/Fernerk.-Preagro-D-RZ.pdf](http://www.preagro.de/preagro_mops/Infomappe2/Fernerk.-Preagro-D-RZ.pdf)  
(letzter Zugriff: 15.11.2008)
- Price, K.P., Guo, X., Stiles, J.M. (2002): Optimal LANDSAT TM band combinations and vegetation indices for discrimination of six grassland types in eastern Kansas. International Journal of Remote Sensing.  
<http://homepage.usask.ca/~xug991/Publications/Optimal%20Landsat%20TM%20band%20combinations%20and%20vegetation%20indices.pdf> (letzter Zugriff: 20.01.2009)
- Qi, J., Chehbouni, A., Huete A.R., Kerr, Y.H., Sorooshian, S. (1994): A modified soil adjusted vegetation index. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 48, S. 119-126
- Ramminger, G. (2004): Erfassung von Sturmschäden mit Hilfe von modernen Radar-Fernerkundungssystemen. Dissertation an der Albert-Ludwigs-Universität, Freiburg im Breisgau.  
<http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/1539/pdf/Dissertation.pdf>  
(letzter Zugriff: 12.08.2008)

- Ratschow, J.-P. (2003): Precision livestock farming  
<http://www.lk-wl.de/fachangebot/technik/haltungsverfahren/precision-livestock-farming.htm> (letzter Zugriff: 27.01.2009)
- Ratschow, J.-P. (2004): Precision Livestock Farming für mehr Betriebserfolg: Voraussetzungen, technische Entwicklungen, praktische Umsetzung. Bauförderung Landwirtschaft e.V. (BfL). DGL-Verlag. Münster-Hiltrup.
- Rentsch, H. (2006): Der befreite Bauer. Anstöße für den agrarpolitischen Richtungswechsel, Avenir Suisse, Verlag Neue Zürcher Zeitung.
- Reuther, M., Häusler, T., Akgöz, E., Hoffmann, K., Stätter, R. (1996): Waldzustandserfassung im Fichtelgebirge und Erzgebirge mit Hilfe der Fernerkundung. Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Universität München und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Heft 160.
- Richardson, A.J., Wiegand, C.L. (1977): Distinguishing vegetation from soil background information. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 43: 1541-1552
- Rizos, Ch. (2002): Introducing the Global Positioning System (GPS). In: Bossler J.D. (2002): *Manual of Geospatial science and technology*. Taylor and Francis, S. 75-94
- Röhle, H., Schmidt, J. (1987): Waldschaden - Zuwachsreaktion – Fernerkundung Vergleichende Beurteilung von Schadstrukturen und Zuwachsmerkmalen geschädigter Fichtenbestände anhand von terrestrischen Erhebungen und Luftbildaufnahmen. Sonderdruck aus *Allgemeine Forst Zeitschrift* Nr. 15/1987. BLV Verlagsgesellschaft mbH, München.  
[www.wwk.forst.tu-muenchen.de/info/publications/OnlinePublications/255.pdf](http://www.wwk.forst.tu-muenchen.de/info/publications/OnlinePublications/255.pdf)  
(letzter Zugriff: 08.12.2008)
- Rösch, Ch., Dusseldorp, M., Meyer, R. (2006): Precision Agriculture: Landwirtschaft mit Satellit und Sensor. Deutscher Fachverlag.
- Rundquist, D.C., Jensen, J.R., Nyquist, M., Owens, T.W. (2002): Selected examples of remote sensing projects. In: Bossler J.D. (2002): *Manual of Geospatial science and technology*. Taylor and Francis, S. 364-388
- Sanders, E. (2002): Precision Farming – Fernerkundung. Vortrag am Institut für Geodäsie und Geoinformation - IGG Bonn.  
[http://www.ikg.uni-bonn.de/vorlesungsarchiv/Gis\\_iv\\_SS\\_02/Vortraege/Sanders.ppt](http://www.ikg.uni-bonn.de/vorlesungsarchiv/Gis_iv_SS_02/Vortraege/Sanders.ppt)  
(letzter Zugriff: 18.11.2008)
- SBI Spatial Business Integration, ADC Agricultural Development Consulting (2006): Site Similarity Certification - Ein neuer Service zur Einsparung landwirtschaftlicher Feldversuche.  
<http://ssc.spatial-business-integration.com> (letzter Zugriff: 30.01.2009)
- Schnug, E., Haneklaus, S., Lilienthal, H., Panten, K. (2000): LASSIE: An innovative approach for the continuous remote sensing of crops. *Association of Applied Biologists* Vol. 60, S. 147-53

- Schön, P.-Ch. (2008): Möglichkeiten und Grenzen der Lautanalyse bei der Überwachung von Tierbeständen. In: Bericht über die KTBL-Tagung zum Thema „Precision Pig Farming“ Bildungs- und Wissenszentrum Boxberg - Schweinehaltung, Schweinezucht – Landesanstalt für Schweinezucht (LSZ).  
[http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1232315\\_11/LSZ\\_KTBL%20Tagung%20Teil%201.pdf](http://www.landwirtschaft-mlr.baden-wuerttemberg.de/servlet/PB/show/1232315_11/LSZ_KTBL%20Tagung%20Teil%201.pdf) (letzter Zugriff: 27.01.2009)
- Schowengerdt, R. A. (2007): Remote Sensing. Models and Methods for Image Processing, Third Edition, Academic Press.
- Schröder, D. (1998): Strategien zur Erfassung der kleinräumigen Heterogenität. In: Erfassung der kleinräumigen Heterogenität: KTBL/ATB Workshop vom 15.-16. Januar 1998 in Potsdam. KTBL Arbeitspapier 264, S. 47-52
- Schulz, S. (2006): Agrarinformatik und Elektronik als Instrumente für eine effektive, umweltschonende und sichere landwirtschaftliche Produktion. Vortrag anlässlich der 26. GIL-Jahrestagung vom 6. – 8. März 2006 in Potsdam  
[www.zalf.de/home\\_zalf/institute/lisa/lisa/gil/pdfmo/pl3.pdf](http://www.zalf.de/home_zalf/institute/lisa/lisa/gil/pdfmo/pl3.pdf) (letzter Zugriff: 05.11.2008)
- Selige, T. (2004): Multispektralanalyse von Fernerkundungsaufnahmen. In: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. (2004): Precision Farming Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL, S. 3.2-55 – 3.2-59
- Semmt, W. (2002): Umweltbeobachtung im Hochgebirge mit operationell arbeitenden Satellitensystemen unter Verwendung von Daten aus Geoinformationssystemen - Möglichkeiten und Grenzen dargestellt an der Umgebung der Rotwand in den Bayerischen Alpen, Dissertation an der Technischen Universität München.  
[http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=967546516&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=967546516.pdf](http://deposit.ddb.de/cgi-bin/dokserv?idn=967546516&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=967546516.pdf) (letzter Zugriff: 05.11.2008)
- SIM Scientific Instruments Manufacturer GmbH (2008): Temperierbare Durchflusszelle Für Agilent Fluoreszenzdetektor  
[http://www.sim-gmbh.de/pdf/sim\\_tFLD\\_produkinfo.pdf](http://www.sim-gmbh.de/pdf/sim_tFLD_produkinfo.pdf) (letzter Zugriff: 03.02.2009)
- Smidt, St. (2004): Waldschädigende Luftverunreinigungen. Eigenschaften, Nachweis, Monitoring, Waldschadensforschung, Immissionsschutz. Bundesamt und Forschungszentrum für Wald.  
[http://bfw.ac.at/600/pdf/620\\_01.pdf](http://bfw.ac.at/600/pdf/620_01.pdf) (letzter Zugriff: 30.01.2009)
- Spilke, J., Büscher, W., Doluschitz, R., Fahr, R.-D., Lehner, W (2003): Precision Dairy Farming – integrativer Ansatz für eine nachhaltige Milcherzeugung. Zeitschrift für Agrarinformatik 2/03.  
[http://www.gil.de/publications/zai/archiv/R8\\_20030005.pdf](http://www.gil.de/publications/zai/archiv/R8_20030005.pdf) (letzter Zugriff: 26.01.2009)

- Spitzer, A., Ludwig, R. (2003): Geodateneinsatz in der Landwirtschaft Verwaltungsvereinfachung durch ressortübergreifende Zusammenarbeit. Bayerisches Staatsministerium für Landwirtschaft und Forsten, Bayerisches Staatsministerium der Finanzen.  
[http://www.geodaten.bayern.de/bvv\\_web/downloads/Vortrag\\_Spitzer\\_Ludwig.pdf](http://www.geodaten.bayern.de/bvv_web/downloads/Vortrag_Spitzer_Ludwig.pdf)  
(letzter Zugriff: 15.12.2008)
- Spreng, V., Auernhammer, H. (2005): Informationsvernetzung im Precision Livestock Farming am Beispiel der Kälberaufzucht, Technische Universität München, Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung, Lehrstuhl für Landtechnik.  
[http://www.tec.wzw.tum.de/landtech/downloads/poster/2005\\_vernetzung\\_kaelber.pdf](http://www.tec.wzw.tum.de/landtech/downloads/poster/2005_vernetzung_kaelber.pdf)  
(letzter Zugriff: 05.11.2008)
- SRU Sachverständigenrat für Umweltfragen (2007): Arzneimittel in der Umwelt. Stellungnahme.  
[http://www.umweltrat.de/03stellung/downlo03/stellung/Stellung\\_Arzneimittel\\_in\\_der\\_Umwelt\\_2007.pdf](http://www.umweltrat.de/03stellung/downlo03/stellung/Stellung_Arzneimittel_in_der_Umwelt_2007.pdf) (letzter Zugriff: 18.11.2008)
- SRU Sachverständigenrat für Umweltfragen (2008)  
[http://www.umweltrat.de/02gutach/downlo02/umweltg/UG\\_2008\\_kap11.pdf](http://www.umweltrat.de/02gutach/downlo02/umweltg/UG_2008_kap11.pdf)  
(letzter Zugriff: 18.11.2008)
- Steinberger, G. (2006): Automatisierte Dokumentation für Precision Farming Forschungsverbundprojekt. pre agro: Teilprojekt 8.  
[http://www.preagro.de/docs/news\\_tp8\\_1.pdf](http://www.preagro.de/docs/news_tp8_1.pdf) (letzter Zugriff: 20.01.2009)
- Steven, M. D., Jaggard, K. W. (1995): Advances in Crop Monitoring By Remote Sensing. In: Danson, F. M., Plummer, S. E. (1995): Advances in Environmental Remote Sensing. John Wiley & Sons Ltd. Chichester, GB, S. 143-156
- Stiftung Unternehmen Wald (2006a): Waldschäden in Deutschland - Was sind die Ursachen.  
<http://www.wald.de/category/forstwirtschaft/waldschaeden/>  
(letzter Zugriff: 05.11.2008)
- Stiftung Unternehmen Wald (2006b): Waldbrand.  
<http://www.wald.de/category/forstwirtschaft/waldbrand/>  
(letzter Zugriff: 05.11.2008)
- Stiftung Unternehmen Wald (2008): Waldzustandsbericht 2007 - Deutschlands Wälder sind noch immer krank.  
<http://www.wald.de/category/waldzustandsbericht-2007/>  
(letzter Zugriff: 05.11.2008)
- Streit, U. (2009): Einführung in die Geoinformatik. Vorlesung Geoinformatik.  
[http://ifgivor.uni-muenster.de/vorlesungen/Geoinformatik/kap/kap10/k10\\_00.htm](http://ifgivor.uni-muenster.de/vorlesungen/Geoinformatik/kap/kap10/k10_00.htm)  
(letzter Zugriff: 05.02.2009)
- tec5 AG: (2007): HandySpec Field.  
[http://www.tec5.com/downloads/datasheets/application\\_notes\\_AN/AN%2014%20HandySpecField\\_d.pdf](http://www.tec5.com/downloads/datasheets/application_notes_AN/AN%2014%20HandySpecField_d.pdf) (letzter Zugriff: 18.11.2008)

- Theilen-Willige, B. (1993): Umweltbeobachtung durch Fernerkundung. Enke Verlag, Stuttgart.
- Thurson, J., Poiker, Th.K., Moore, J.P.: (2003): Integrated geospatial technologies: a guide to GPS, GIS and data logging. John Wiley and Sons, Inc.
- TLL Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft, DJO Daimler Chrysler Aerospace Jena-Optronik GmbH (2000): Nutzung hochauflösender Satellitendaten für Aufgaben der Landwirtschaftsverwaltung Thüringens Abschlußbericht HOLT 3.  
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e001/311243967.pdf>  
(letzter Zugriff: 25.11.2008)
- TLWJF Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei (2003): Verfahrensentwicklung zur Fernerkundungsbasierten Erstellung des Walverzeichnisses Thüringen  
<http://edok01.tib.uni-hannover.de/edoks/e01fb04/472972111.pdf>  
(letzter Zugriff: 15.11.2008)
- Todd, S.W., Hoffer, R.M., Milchunas, D.G.,(1998): Biomass estimation on grazed and un-grazed rangelands using spectral indices. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, S. 427- 438
- Ullrich, E., Krüger, Ch., Bergfeld, U. (2006): Gesundheits- und Hygienemanagement in ökologisch wirtschaftenden Betrieben mit Milchkühen Ein Demonstrationsprojekt der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft, In: Ullrich, E., Steinhöfel, I., Pache, S. (2006): Milchrindhaltung und –fütterung, Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft.  
[http://www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen/download/1888\\_1.pdf](http://www.landwirtschaft.sachsen.de/lfl/publikationen/download/1888_1.pdf)  
(letzter Zugriff: 15.10.2008)
- van der Schans, D., Jukema, J.N., van der Klooster, A., Molenaar K., Krebbers, H., Korver, R., van Roessel, G.-J., Meertens, L., Truiman, J. (2008): Toepassing GPS en GIS in de akkerbouw Nut en rendement van toepassingen op het gebied van geolandbouw. Praktijkonderzoek Plant & Omgeving B.V., Wageningen.  
<http://library.wur.nl/way/bestanden/clc/1871703.pdf> (letzter Zugriff: 15.12.2008)
- VDMA Fachverband Landtechnik (2005): ISOBUS spricht alle Sprachen. Reden Sie doch einfach mit. ISOBUS Marketingbroschüre.  
[http://www.isobus.net/isobus\\_D/Downloads/Marketing\\_Material/ISOBUS-Marketing\\_broschuere\\_deutsch.pdf](http://www.isobus.net/isobus_D/Downloads/Marketing_Material/ISOBUS-Marketing_broschuere_deutsch.pdf)  
(letzter Zugriff: 20.01.2009)
- Vista – Geowissenschaftliche Fernerkundung GmbH (2005): "Ich sehe was, was du nicht siehst" Landwirtschaft  
[http://www.vista-geo.de/pdf/vista\\_agri\\_flyer\\_d.pdf](http://www.vista-geo.de/pdf/vista_agri_flyer_d.pdf) (letzter Zugriff: 24.10.2008)

- Voß, K. (2005): Beitrag zur skalenabhängigen Erfassung teilschlagspezifischer Pflanzenschäden mit Methoden der Fernerkundung und Geoinformation. Dissertation an der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.  
[http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=976496305&dok\\_var=d1&dok\\_ext=pdf&filename=976496305.pdf](http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?idn=976496305&dok_var=d1&dok_ext=pdf&filename=976496305.pdf) (letzter Zugriff: 08.07.2008)
- Voßhenrich, H.H. (2004): Teilflächenspezifische Grundbodenbearbeitung. In: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. (2004): Precision Farming Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL, S. 4.2-1 – 4.2-4
- Wathes, Ch. (2007): Precision Livestock Farming for Animal Health, Welfare and Production, The Royal Veterinary College University of London  
<http://www.isah-soc.org/ISAH%202007/PLENARY%20LECTURES-ISAH-2007/Plenary%20lectures-June19.2007/Christopher%20WATHES.pdf>  
(letzter Zugriff: 05.11.2008)
- Wegehenkel, M. (2006): Die Nutzung von Fernerkundungsdaten in der Wasserhaushaltsmodellierung, AG Fernerkundung und GIS Institut für Landschaftssystemanalyse, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF).  
[http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2006/705/pdf/IMAF\\_060209\\_Wegehenkel.pdf](http://opus.kobv.de/ubp/volltexte/2006/705/pdf/IMAF_060209_Wegehenkel.pdf)  
(letzter Zugriff: 18.11.2008)
- Werner, A. (2004): Einführung. In: Hufnagel, J., Herbst, R., Jarfe, A., Werner, A. (2004): Precision Farming Analyse, Planung, Umsetzung in die Praxis. KTBL, S. 1-1 – 1-14
- Wikipedia (2007): Ground Truth.  
[http://de.wikipedia.org/wiki/Ground\\_Truth](http://de.wikipedia.org/wiki/Ground_Truth) (letzter Zugriff: 13.02.2009)
- Wikipedia (2008a): Quickbird.  
<http://de.wikipedia.org/wiki/Quickbird> (letzter Zugriff: 20.02.2009)
- Wikipedia (2008b): Hochleistungsflüssigkeitschromatografie.  
<http://de.wikipedia.org/wiki/HPLC> (letzter Zugriff: 03.02.2009)
- Wikipedia (2008c): Rückverfolgbarkeit (Produktionswirtschaft).  
[http://de.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCckverfolgbarkeit\\_\(Produktionswirtschaft\)](http://de.wikipedia.org/wiki/R%C3%BCckverfolgbarkeit_(Produktionswirtschaft))  
(letzter Zugriff: 05.02.2009)
- Will, H. (1996): Fernerkundung und Weideökologie in der subhumiden Savannenzzone NW-Benins. In: Karlsruher Schriften zur Geographie und Geoökologie, Band 4, Karlsruhe.
- Wulder, M.A., Franklin, S.E. (2003): Remote Sensing of Forest Environments, Introduction. The Transition from Theory to Information. In: Wulder, M.A., Franklin, S.E. (2003): Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and Case Studies. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, NL, S. 3-12

- Yang, C., Everitt, J.H. (2002): Relationships between yield monitor data and airborne multi-date multispectral digital imagery for grain sorghum. In: Precision Agriculture 3, S. 373-388
- YARA GmbH & Co. KG (2009) <http://fert.yara.de/de/> (letzter Zugriff: 05.02.2009)
- Zabel, G. (1975): Die Fernerkundung durch Satelliten und ihre Anwendung in der Landwirtschaft. Duncker & Humblot, Berlin.
- Zeiss (2009) [www.zeiss.de](http://www.zeiss.de) (letzter Zugriff: 05.02.2009)
- Zillmann, E. (1999): Versuch der Lokalisierung und Interpretation von Feldheterogenitäten anhand von optischen Satellitenaufnahmen - Ein Vergleich von Landsat Thematic Mapper und IRS-1C. Diplomarbeit am Institut für Landschaftsentwicklung der Technischen Universität Berlin.  
[http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2005/1101/pdf/zillmann\\_erik\\_text.pdf](http://opus.kobv.de/tuberlin/volltexte/2005/1101/pdf/zillmann_erik_text.pdf)  
(letzter Zugriff: 15.01.2009)