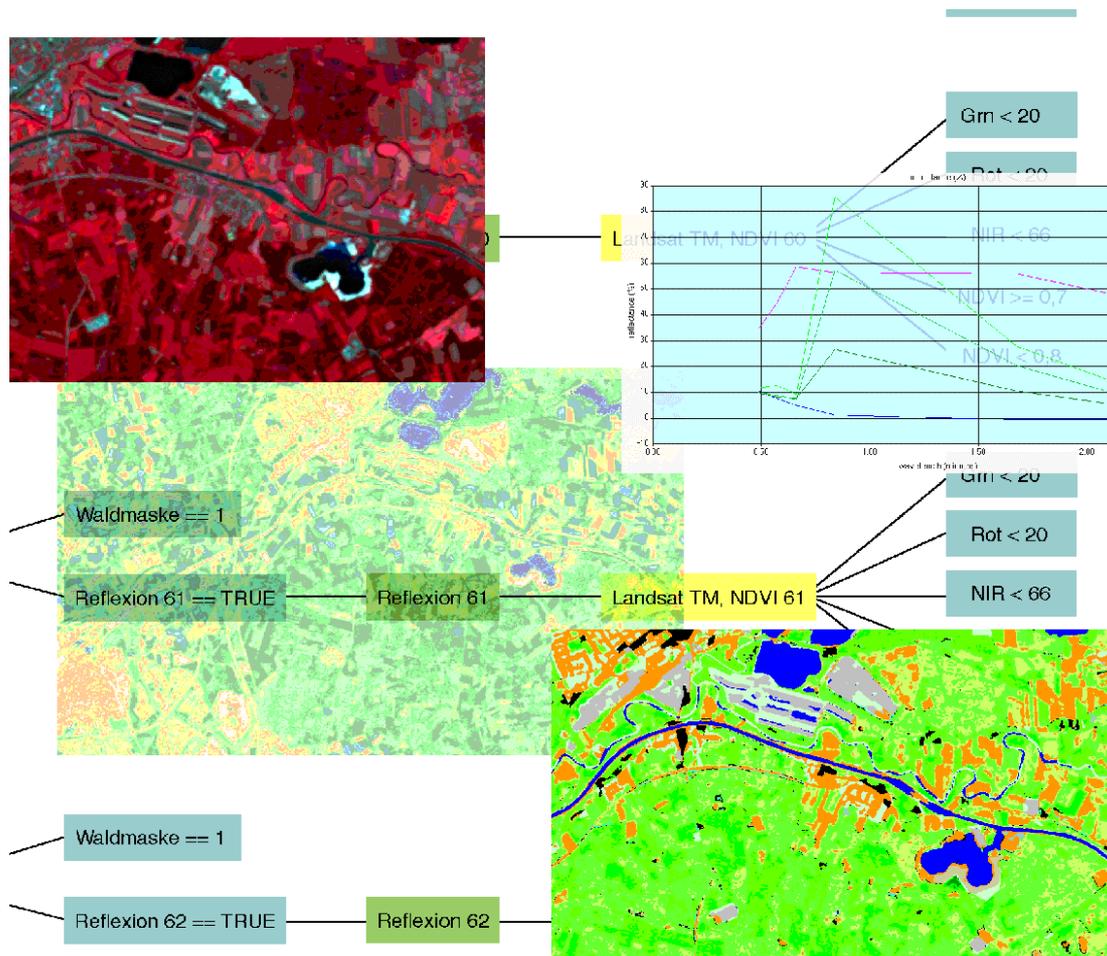


# Rechnergestützte Bilddatenanalyse im Umweltmonitoring: Zum Einsatz wissenschaftlicher Klassifikationen und Veränderungsanalysen mit handelsüblicher Fernerkundungssoftware



Christiane Lechtenböcker

Bochum  
April 2001

**Rechnergestützte Bilddatenanalyse im Umweltmonitoring:  
Zum Einsatz wissensbasierter Klassifikationen und  
Veränderungsanalysen mit handelsüblicher Fernerkundungssoftware**

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades (Dr. rer. nat.)  
der Fakultät für Geowissenschaften der Ruhr-Universität Bochum

vorgelegt von  
Christiane Lechtenböcker

Bochum  
April 2001

## Inhaltsverzeichnis

	Seite
Inhaltsverzeichnis.....	III
Abbildungsverzeichnis.....	VI
Kartenverzeichnis.....	XV
Tabellenverzeichnis.....	XVI
Abkürzungsverzeichnis.....	XX
Geleitwort.....	XXIV
Literaturverzeichnis.....	247
Verzeichnis der Internet-Adressen.....	272
Verzeichnis der Luft- und Satellitenbilddaten.....	274
Bezugsquellen der Karten.....	275
Anhang A.....	278
Anhang B.....	304

	Seite
<b>0 Vorbemerkungen</b> .....	<b>1</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>2</b>
1.1 Problemstellung und Thematik .....	2
1.2 Forschungsstand im Bereich Umweltmonitoring .....	3
1.2.1 Der Begriff Umweltmonitoring .....	3
1.2.2 Umweltmonitoring: Umsetzung und Durchführung .....	5
1.3 Umweltmonitoring und Fernerkundung .....	9
1.4 Ziele der Arbeit .....	21
<b>2 Rahmenbedingungen</b> .....	<b>25</b>
2.1 Das Untersuchungsgebiet .....	25
2.1.1 Auswahlkriterien .....	25
2.1.2 Das Untersuchungsgebiet: relevante physisch-geographische Merkmale .....	27
2.1.3 Das Untersuchungsgebiet: relevante siedlungsgeographische Merkmale und anthropogene Einflüsse .....	31
2.2 Die Informationsquellen .....	32
2.2.1 Thematische und Topographische Karten und Kartenwerke .....	33
2.2.2 Meteorologische und phänologische Daten und Statistiken .....	34
2.2.3 Fernerkundungsdaten .....	35
2.3 Technische Ausstattung .....	36
<b>3 Datenvorprozessierung der Fernerkundungsdaten</b> .....	<b>39</b>
3.1 Datenvorprozessierung der Luftbilddatensätze .....	40
3.2 Datenvorprozessierung der Satellitenbilddaten .....	53
3.2.1 Datenvorprozessierung: Atmosphärenkorrektur - theoretischer Rahmen .....	54
3.2.2 Datenvorprozessierung: Atmosphärenkorrektur der benutzten Satellitenbildausschnitte .....	71
3.2.3 Datenvorprozessierung: Geocodierung und Verbesserung der Detailschärfe - theoretischer Rahmen .....	85
3.2.4 Datenvorprozessierung: Durchführung der Geocodierung und Verbesserung der Detailschärfe der benutzten Satellitenbilddaten .....	91
<b>4 Analyse der Daten</b> .....	<b>94</b>
4.1 Analyse der Kollateralquellen .....	94
4.2 Analyse der Fernerkundungsdaten .....	96
4.2.1 Vegetation als Indikator .....	97
4.2.2 Eingangsdaten für die wissensbasierten Klassifikationen: Generierung und Vorbereitung .....	110
4.2.3 Klassifikation der Fernerkundungsdaten - theoretischer Hintergrund .....	111
4.2.4 Techniken der Veränderungsanalyse - theoretischer Hintergrund und Vorstellung eingesetzter Verfahren .....	126

	Seite
<b>5 Ergebnisse</b> .....	<b>139</b>
5.1 Ergebnisse der Fallstudien (inkl. CD-Teil zu Kap. 5.1).....	139
5.1.1 Informationsquellen für den wissensbasierten Klassifikator .....	139
5.1.1.1 Vegetationsindexbilder und RG-Indexbild .....	139
5.1.1.2 Bildsegmentierung auf Basis der digitalen DGK5- und der ATKIS-Daten: Paßgenauigkeit und Aktualität der Daten .....	149
5.1.2 Design der wissensbasierten Klassifikatoren .....	152
5.1.2.1 Design der wissensbasierten Klassifikatoren für die Luftbildmosaike .....	155
5.1.2.2 Design des wissensbasierten Klassifikators für die Landsat TM-Datensätze vom 01.05.1986, 17.05.1986 und 02.07.1991 .....	161
5.1.2.3 Design des wissensbasierten Klassifikators für die Kategorie „Wald“ der Landsat TM-Szenen vom 01.05.1986, 17.05.1986 und 02.07.1991 .....	163
5.1.2.4 Design des wissensbasierten Klassifikators für die Landsat MSS-Szene vom 02.07.1991 .....	165
5.1.3 Wissensbasierte Klassifikationen der einzelnen Fernerkundungs- datensätze .....	167
5.1.3.1 Wissensbasierte Klassifikation des CIR-Luftbildmosaiks .....	170
5.1.3.2 Wissensbasierte Klassifikation des Color-Luftbildmosaiks .....	175
5.1.3.3 Wissensbasierte Klassifikation der Landsat-TM-Datensätze sowie des Landsat-MSS-Datensatzes .....	181
5.1.4 Ergebnisse der exemplarisch durchgeführten Veränderungsanalysen .....	203
5.1.4.1 Veränderungsanalyse der Luftbildmosaike .....	206
5.1.4.2 Veränderungsanalyse der Landsat TM-Szenen .....	212
5.2 Handlungsempfehlungen für die Praxis .....	219
<b>6 Fehlerdiskussion</b> .....	<b>223</b>
<b>7 Kalkulation</b> .....	<b>235</b>
<b>8 Schlußfolgerungen</b> .....	<b>240</b>
8.1 Zusammenfassung und Bewertung .....	240
8.2 Ausblick .....	243
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>247</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1:	Monitoring: Arbeitsablauf nach STÖHR.....	6
Abb. 1.2:	Monitoring: Arbeitsablauf nach SPELLERBERG.....	7
Abb. 1.3:	Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten in der vorliegenden Studie.....	8
Abb. 1.4:	Beispielhaftes Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme.....	9
Abb. 1.5:	Beispielhaftes Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme.....	21
Abb. 2.1:	Beispielhaftes Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme.....	26
Abb. 2.2:	Darstellung der verschiedenen Teiluntersuchungsräume: Luftbildabdeckung: innenliegender farbiger Bereich; Abdeckung durch ATKIS-Daten: schwarz-weiß gefärbter Bereich; Satellitenbildabdeckung: äußerer farbiger Bereich. Datenquellen: Landsat TM-Ausschnitt vom 02.07.91, Kanalkombinationen 432 und TM-Kanal 4, CIR-Luftbildmosaik vom 25.07.1985.....	27
Abb. 2.3:	Beispielhaftes Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme.....	33
Abb. 3.1:	Beispielhaftes Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme.....	39
Abb. 3.2:	Spektrale Empfindlichkeit des Colorscanners im Vergleich zu den Farbdichtekurven der drei Filmschichten.....	41
Abb. 3.3.:	Arbeitsablauf der Mosaikierung der Luftbilder.....	44
Abb. 3.4:	Digitalisiertes CIR-Luftbild Nr. 666: Referenzpunkte.....	45
Abb. 3.5:	Digitalisiertes CIR-Luftbild Nr. 666, geocodiert auf das Gauß-Krüger-Koordinatensystem: Paßpunktlage für die Referenzierung auf das südlich gelegene Bild Nr. 716 sowie Punkte, die die bestehende Geocodierung außerhalb des Überlappungsbereichs „festhalten“.....	45
Abb. 3.6:	1. Schritt der Mosaikierung von CIR-Bildnr. 666 zu 716: Herstellung eines internen Mosaiks, wobei Mosaik Nr. 2 ein Mosaik des Überlappungsbereichs zwischen Nr. 666 und Nr. 716 ist, das radiometrisch auf das Bild Nr. 716 angepaßt ist.....	46
Abb. 3.7:	Ergebnis der internen Mosaikierung.....	47
Abb. 3.8:	2. Schritt: Mosaikierung der Bilder Nrn. 666 und 716.....	47

	Seite
Abb. 3.9: Ergebnis der Mosaikierung der Bilder Nrn. 666 und 716.....	48
Abb. 3.10: Digitalisierte CIR-Luftbilder Nrn. 664-666, 714-716 im Teilmosaik. Dargestellt sind zudem die Paßpunkte für die Referenzierung eines weiteren Bildpaares als Vorbereitung der darauffolgenden Mosaikierung....	48
Abb. 3.11: Mosaikierung des Teilmosaiks der Bilder Nrn. 666 und 716 mit dem bisherigen Teilmosaik aus den Bildern Nrn. 664, 665, 714, 715.....	49
Abb. 3.12: Ergebnis der Mosaikierung des Teilmosaiks 666-716 mit dem früheren Teilmosaik 664, 665, 714, 715.....	50
Abb. 3.13: Histogramme des digitalen CIR-Luftbildmosaiks.....	51
Abb. 3.14: Histogramme des digitalen Color-Luftbildmosaiks.....	52
Abb. 3.15: Modell zum abnehmenden Einfluß des Luftlichts in Abhängigkeit von der Wellenlänge.....	55
Abb. 3.16: Vereinfachtes Modell der atmosphärischen Effekte auf die Reflexion eines Zielobjektes.....	56
Abb. 3.17: Schema der Regressionsmethode zur Atmosphärenkorrektur.....	58
Abb. 3.18: Organigramm der zentralen Submodule in ATCOR2.....	68
Abb. 3.19: Funktionen in ERDAS Imagine zur Durchführung der kanalweisen Histo- grammverschiebung des Landsat TM-Datensatzes vom 17.05.1986.....	73
Abb. 3.20: Korrigierter Landsat TM-Satellitenbildausschnitt vom 01.05.1986: Histogramme	74
Abb. 3.21: Vergleich der Entwicklung der Histogramme der Landsat TM-Kanäle 3 (links) und 4 (rechts) im zeitlichen Verlauf: 01.05.1986, 17.05.1986, 02.071991.....	77
Abb. 3.22: Korrigierter Landsat TM-Satellitenbildausschnitt vom 17.05.1986: Histogramme	78
Abb. 3.23: Korrigierter Landsat TM-Satellitenbildausschnitt vom 02.07.1991: Histogramme	80
Abb. 3.24: Histogrammvergleich des TM-Kanal 4 vor und nach der Atmosphären- korrektur der Daten.....	82
Abb. 3.25: Korrigierter Landsat MSS-Satellitenbildausschnitt vom 02.07.1991: Histogramme.....	83
Abb. 3.26: Vereinfachte schematische Darstellung des Effekts der Pixelvervielfachung....	88
Abb. 3.27: Vergleich der Detailschärfe: links Pixelvervielfachung mit 10 m Pixel- kantenlänge (Bilineare Interpolation) - rechts nominelle Pixelkantenlänge von 30 m.....	89

Abb. 3.28: Einstellungen für die einfache Pixelvervielfachung im Rahmen der Geocodierung in ERDAS Imagine.....	91
Abb. 4.1: Beispielhaftes Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme.....	97
Abb. 4.2: Das typische Reflexionsspektrum von Vegetation.....	101
Abb. 4.3: Das Reflexionsverhalten eines Blattes in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt	104
Abb. 4.4: Typische Reflexionskurven von stark und schwach reflektierenden Bodenoberflächen im Vergleich zur typischen Reflexion von Vegetations- und Wasserflächen .....	105
Abb. 4.5: Beispiel einer Fuzzyklassifikation .....	114
Abb. 4.6: Schematisierter Ablauf einer Klassifikation mit Hilfe eines Neuronalen Netzwerks.....	117
Abb. 4.7: Schematisierter Aufbau eines regelbasierten Expertensystems.....	119
Abb. 4.8: Aufbau eines einfachen Entscheidungsbaumes im „knowledge engineer“ .....	122
Abb. 4.9: Komplexe Struktur eines Entscheidungsbaumes im „knowledge engineer“ ..	123
Abb. 4.10: Die Anwendung von Konfidenzwerten in verschiedenen Hierarchien eines Entscheidungsbaumes im „knowledge engineer“ .....	124
Abb. 4.11: Ergebnishistogramm einer Ratiobildung zweier NDVI-Bilder.....	128
Abb. 4.12: Schematisierte Darstellung der Analyse über den spektralen Veränderungsvektor.....	131
Abb. 4.13: Dialogfenster des Moduls „change detection“ in ERDAS Imagine 8.4.....	136
Abb. 4.14: Dialogfenster zur Rekodierung der Klassen.....	138
Abb. 5.1: Vergleichende Gegenüberstellung der Empfindlichkeit und Detailauflösung der Farben der Indizes NDVI, SAVI und TSAVI (oben rechts, unten links, unten rechts). Nicht vitale Flächen werden im NDVI-Bild in dunkelgrau bis grau dargestellt. Gering vitale Bereiche werden in den Farben dunkelbraun, hellbraun und ocker abgebildet (vgl. Suchbox in der weitestgehend unbestellten Ackerfläche: CIR-Luftbildmosaik oben links). In den beiden anderen Indexbildern werden hierzu lediglich zwei NDVI-Stufen unterschieden.....	140

Abb. 5.2:	Beispiel für den Einfluß der Spektraleigenschaften der Originalluftbilder (Randabfall) auf den NDVI: tendenziell nach unten zunehmende „Vitalität“ v.a. der Laubwaldflächen, gekennzeichnet durch den +/- Pfeil sowie die kräftigeren Grüntöne im unteren Bildbereich trotz gleichbleibender Objekteigenschaften.....	141
Abb. 5.3:	Vergleich der Reflexion von Laubwaldflächen: Lage in der oberen Bildhälfte (Suchbox) sowie Lage am unteren Bildrand (Fadenkreuz). Im klassifizierten Bild rechts wird die Laubwaldfläche im Bereich der Suchbox trotz gleichbleibender Objekteigenschaften im Vergleich zu der Waldfläche am unteren Bildrand als weniger „grün/vital“ eingestuft (hellere Grüntöne im Vergleich zu dunkleren, kräftigeren Grüntönen). Dieses Phänomen wird durch den Randabfall in den Originalbildern hervorgerufen.....	142
Abb. 5.4:	Boden- und Holzreflexion für die Laubwaldfläche entsprechend der phänologischen Entwicklung des Laubwaldes am 05.05.1990, erkennbar durch die Schattierungen in Grün, Ocker, Gelb und Orange in der Laubwaldfläche im Bildzentrum, klassifiziertes Bild rechts (vgl. Suchboxen zur besseren Orientierung). Dabei repräsentiert der Farbverlauf von Grün nach Orange abnehmende Grünreflexion.....	143
Abb. 5.5:	Beispiel eines Extrembereichs: Vergleich sehr vitaler Flächen, dargestellt über kräftig-dunkle Grün- und Türkistöne in den NDVI-Bildern.....	145
Abb. 5.6:	Visuelle Unterscheidbarkeit von kahlem Untergrund (hellgelb, symbolisiert durch den Buchstaben „K“) und versiegelten Flächen (meist Orangetöne, symbolisiert durch den Buchstaben „S“) im Satellitenbildausschnitt (Kanäle 4, 3, 2, oben) und im MNDVI-Bild vom 17.05.1986 (unten).....	146
Abb. 5.7:	NDVI-Bilder - Beispiel eines Extrembereichs: Vergleich sehr vitaler Flächen, dargestellt über kräftig-dunkle Grün- und Türkistöne.....	147
Abb. 5.8:	Streifenstruktur im NDVI-Bild der MSS-Aufnahme vom 02.07.1991. Die roten Pfeile veranschaulichen die Lage der in regelmäßigen Abständen auftretenden Streifen (auf Prozentwerte atmosphärenkorrigiert, Pixelkantenlänge: 10 m). Vermutete Ursache: Phänomen des „sixth-line banding“ .....	148
Abb. 5.9:	CIR-Luftbildmosaik mit aufliegender Maske (blau) für Wasserflächen: Paßungenaugigkeiten aufgrund der Mosaikierung werden beispielhaft durch hellgrüne Linien gekennzeichnet.....	149

Abb. 5.10: Laut DGK5 als Grünland ausgewiesene Flächen (Maske Grünland: grau), die im Color-Luftbildmosaik von 1990 zu einem Fußball- und einem Bolzplatz umgenutzt waren.....	150
Abb. 5.11: Vergleich der Paßungenaugigkeit der Wassermaske (blau) aus ATKIS-Daten (1999) mit der Ausdehnung einer Wasserfläche am 01.05.1986. Durch rote Linien sind einige Stellen beispielhaft hervorgehoben.....	151
Abb. 5.12: Schematisierter Aufbau eines Entscheidungsbaumes für eine Hypothese.....	152
Abb. 5.13: Schematisiertes Organigramm des empirisch-iterativen Vorgehens.....	153
Abb. 5.14: Kategorie Mischnutzung: Wiesenflächen mit unterschiedlich starken „Abnutzungserscheinungen“ evtl. durch Nutzung der Flächen als Bolzplatz oder Parkplatz (innerhalb der markierten Flächen im rechten, klassifizierten Bildausschnitt: orange zeigt kahlen Boden an, olivgrün zeigt Übergangsbereiche zwischen nicht vitaler und vitaler Vegetation an, hellgrün zeigt vegetationsverdeckte Areale an).....	158
Abb. 5.15: Klassifikation der Kategorie „Laubwald“: Beispiel für eine Trennung von laub- und nadelwalddominierten Parzellen (respektive helle bzw. dunkle Grüntöne im klassifizierten Bildausschnitt rechts). In der unteren Suchbox ist der Nadelwaldbestand sehr homogen, die Suchbox in der Bildmitte zeigt den Unterschied zwischen einem homogenen Bestand (unten) und einem Mischbestand (oben), während die obere Suchbox das Problem von Mischwaldbeständen sehr gut verdeutlicht. Dunkelgrau gefärbte Flächen repräsentieren die Klasse „verschattete Bereiche“.....	160
Abb. 5.16: Anteil der Reflexion von Baumholz und durchscheinendem Boden am Beispiel einer Laubwaldparzelle (hellbraune Bereiche: Dominanz von Baumholz bzw. durchscheinendem Boden; hellgrüne Bereiche: Reflexion von grüner Vegetation dominiert).....	160
Abb. 5.17: Beispiele für nicht definierte (weiß) bzw. nicht klassifizierte Bereiche (hellgrau): Klassifikation der Kategorie „Ackerflächen“ des CIR-Luftbildmosaiks.....	169
Abb. 5.18: Kategorie „Wasserflächen“ für das CIR-Luftbildmosaik, Unterklasse „trübe oder spiegelnde Wasserflächen“. Mit der Suchbox sind aufgewirbelte Wasserflächen markiert, das Fadenkreuz hebt Schiffskörper hervor (hellblau gefärbte Bereiche im klassifizierten Bild rechts).....	170
Abb. 5.19: Wasserfläche unter 1 ha Ausdehnung in der Kategorie „Grünland“, rechts im klassifizierten Bild größtenteils blau eingefärbt.....	171

Abb. 5.20: Übergang von nicht vitalen zu vitalen Flächen (olivgrün, rechts im klassifizierten Bild) in direkter Nachbarschaft zu Bereichen, die als kahler Boden klassifiziert wurden (orange eingefärbte Flächen)..... 172

Abb. 5.21: Unterklasse „verschattete Bereiche“ der Kategorie „Ackerflächen“, die für diese Szene vor allem durch Baumbestand hervorgerufen werden (dunkelgraue Flächen im klassifizierten Bild rechts)..... 173

Abb. 5.22: Umnutzung von Laubwaldflächen in Ackerland: z.T. liegt kahler Untergrund vor (orange eingefärbt im klassifizierten Bild rechts), z.T. ist die ehemalige Waldfläche bestellt (verschiedene Grüntöne). An der Landnutzungsgrenze zwischen Wald und Ackerfläche wird ein schmaler Saum als „verschattete Bereiche“ klassifiziert (dunkelgrau)..... 174

Abb. 5.23: Klassifikation der Grünlandflächen oben links, Klassifikation der Ackerflächen oben rechts; unten: die Synthese der Einzelklassifikation zeigt Zusammenhänge auf..... 174

Abb. 5.24: Straßenbegleitgrün und Schattenwurf auf Straßenflächen (gelb): hellgrüne und dunkelgraue Bereiche in der gelb markierten Straßenfläche ..... 176

Abb. 5.25: Durchscheinender Boden, Holzanteil oder Rodungsflächen: links im Luftbildmosaik (hellere „Flecken“ /Felder), rechts im klassifizierten Bild hellbraun eingefärbt..... 179

Abb. 5.26: Nadelwaldfläche, die fälschlicherweise großflächig der Unterklasse „verschattet“ zugeordnet wird. Im Luftbild links: kräftig dunkelgrün eingefärbte Fläche, im klassifizierten Bild rechts dunkelgrau gefärbt..... 180

Abb. 5.27: Klassenübergreifende Darstellung kahler Flächen (orange) sowie Unterscheidung der Kategorien „Grünland“ (dunkelgrün) und „Ackerland“ (hellgrün), jeweils vegetationsbestanden..... 181

Abb. 5.28: Lippeverlauf, Klassifikation der Landsat TM-Szene vom 02.07.1991: weite Strecken werden als vegetationsverdeckt (hellgrün gefärbt) ausgewiesen, Wasserflächen sind blau, kahle bzw. versiegelte Flächen sind orange eingefärbt..... 182

Abb. 5.29: Landsat TM-Szene vom 17.05.1986 oben links, daneben die Szene vom 02.07.1991 rechts sowie die Klassifizierung der Szene vom 02.07.1991 darunter: Wasserflächen sind blau, Sandflächen orange eingefärbt. Die Uferlinie ist im Verlauf von 5 Jahren zurückgedrängt worden..... 183

Abb. 5.30: TM-Szene vom 02.07.1991: Klassifizierung der Filterbecken rechts, wobei Teile als vegetationsverdeckt ausgewiesen werden (s. Umfeld des Fadenkreuzes: grün gefärbt), während die restlichen Flächen der Bildsegmentierung als Wasserflächen klassifiziert werden (blau)..... 185

Abb. 5.31: CIR-Luftbildmosaik: Klassifizierung der Kategorie „Wasserflächen“, die in vier Unterklassen unterteilt ist. Weite Teile der Filterbecken sind als vegetationsverdeckt ausgewiesen und in dem klassifizierten Bild rechts grün gefärbt.....	185
Abb. 5.32: Abnahme der Vegetation im Ufersaum eines Baggersees: 17.05.1986 (links) zu 02.07.1991 (rechts). Vegetation ist grün, vegetationslose Flächen sind braun gefärbt.....	187
Abb. 5.33: Bildsegmentierung für die Kategorie „Grünland“, Landsat TM-Szene vom 01.05.1986: Klassifizierung von kahlem Untergrund und vegetationsbestandenen Flächen. Rechts im klassifizierten Bild ist exemplarisch eine kahle Fläche in der Form einer Ackerparzelle durch das Fadenkreuz hervorgehoben (orange=kahler Untergrund bzw. versiegelt).....	191
Abb. 5.34: Vergleich der Klassifizierungen der Landsat TM-Szene oben und der MSS-Szene unten. Kahle Flächen werden in der MSS-Szene deutlich unterschätzt (dargestellt in orange für beide Klassifizierungen).....	196
Abb. 5.35: Beispielhafter Ablauf einer klassenübergreifenden Veränderungsanalyse: links das „Vorherbild“, eine vegetationsbestandene Grünlandfläche, die auf die Klassennummer 10 rekodiert wurde. In der Mitte: das „Nachherbild“ des gleichen Geländeausschnitts, in dem eine Wasserfläche auf die Klassennummer 10 rekodiert wurde. In der Abbildung rechts ist das Ergebnis der Veränderungsanalyse zu sehen: dort wo keine Veränderungen angezeigt werden (graue Fläche) hat tatsächlich Veränderung stattgefunden, die rot gefärbte Fläche zeigt vermeintlich Veränderungen an; dies ist auf die Rekodierung zurückzuführen.....	206
Abb. 5.36: Veränderungsanalyse vegetationsbestandener Grünlandflächen: Zunahme der Flächen, die durch ihre Größe und Form relativ sicher als Ackerparzellen zu identifizieren sind (oben links: CIR-Luftbildmosaik 1985, oben rechts: Color-Luftbildmosaik 1990, unten Mitte: Ergebnis der Veränderungsanalyse; grün gefärbte Flächen).....	207
Abb. 5.37: Umnutzung von Grünlandflächen als Sportplätze: Abnutzungen und folglich Abnahme der Rasenflächen werden über rot gefärbte Flächen angezeigt (unten Mitte: Ergebnis der Veränderungsanalyse).....	208
Abb. 5.38: Grünlandfläche mit Veränderungen, oben: Color-Luftbildmosaik 1990, unten im Veränderungsbild: sehr gut sichtbar für die rot gefärbten Bereiche die Abnahme der Vitalität bzw. des „Grünheitsgrades“ der Vegetation für eine große Fläche im Bildzentrum.....	209

- Abb. 5.39: Tendenziell zeigt die Veränderungsanalyse vegetationsfreier Flächen (links) die gleiche Art der Veränderung wie die Analyse der vegetationsbestandenen Flächen (rechts) an: rote Flächen deuten auf die Abnahme bzw. den Wegfall vegetationsloser Flächen hin (links), während grüne Flächen auf die Zunahme vegetationsverdeckter Areale hindeuten (rechts). Allerdings deutet die Diagnose links darauf hin, daß noch weitere Klassen Veränderungen erfahren haben, da einige Bereiche der überwiegend rotgefärbten Fläche links grau eingefärbt sind, während sie im Bild rechts nicht mehr auftreten, sondern als Flächenzuwachs für vegetationsbestandene Flächen ausgewiesen werden..... 209
- Abb. 5.40: Die Unterklasse „Übergang nicht vital-vital“ der Klassifikation des CIR-Luftbildmosaiks wird bei der Veränderungsanalyse der vegetationsfreien Flächen nicht berücksichtigt (olivgrün gefärbte Bereiche in dem klassifizierten Bild links; vgl. auch Abb. 5.39 links); bei der Analyse vegetationsbestandener Flächen allerdings werden diese Flächen mit einbezogen (Rekodierung), die Veränderungsanalyse zeigt eine Zunahme der vegetationsbestandenen Flächen für den Zeitraum von 1985 bis 1990 (vgl. Abb. 5.39). Die grau eingefärbten Teilflächen in der überwiegend rot gefärbten Fläche rechts lassen sich somit über die Einzelbildklassifikation des CIR-Luftbildmosaiks als Areale der Unterklasse „Übergang nicht vital-vital“ identifizieren..... 210
- Abb. 5.41: Beispiel für den minimalen Flächenzuwachs vegetationsbestandener Waldflächen (grün gefärbt im Veränderungsbild unten; das Fadenkreuz dient zur Orientierung), Nördlich davon wird über eine homogen rot gefärbte Fläche ein Rodungsareal angezeigt..... 211
- Abb. 5.42: Deutliche Zunahme der vegetationsverdeckten Bereiche der Kategorie „Grünland“ vom 01.05.1986 (links oben) zum 17.05.1986 (rechts oben), dargestellt in der Veränderungsanalyse (grün gefärbte Bereiche im Veränderungsbild unten Mitte)..... 214
- Abb. 5.43: Die vegetationsfreie Fläche (1986, links) zeigt für die Aufnahme von 1991 (Mitte) Vegetation an. Das belegt die Veränderungsanalyse (rechts, grün eingefärbte Fläche im Bereich des Fadenkreuzes)..... 215
- Abb. 5.44: Die über gelbe Boxen gekennzeichneten Veränderungsflächen (rot) weisen auf Kahlschlag- bzw. Rodungsflächen in nadelwalddominierten Bereichen hin..... 216
- Abb. 5.45: Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringverfahren..... 222

- Abb. 6.1: „Mehr“-Klassifizierungen von Vegetation infolge von Paßungenauigkeiten zwischen der Maske für die Kategorie „Wasserflächen“ und dem CIR-Luftbildmosaik..... 224
- Abb. 6.2: Beispiel für die „Saumbildung“ im Zuge der Veränderungsanalyse. Der Saum entsteht durch leichte Lageabweichungen der beiden Luftbildmosaike zueinander. Im klassifizierten Bild unten wird dies durch die linienhafte Struktur der rot und grün gefärbten Veränderungsbereiche für die Analyse der vegetationsbestandenen Grünlandflächen deutlich. Es kommt zu einer vermeintlichen Abnahme der Flächenausdehnung (rote Bereiche)..... 225
- Abb. 6.3: Fehlklassifizierungen durch Grauwertveränderungen im Rahmen der einfachen Pixelvervielfachung für die Kategorie „Gewässer“: grün gefärbte Bereiche im Lippeverlauf zeigen vermeintlich vegetationsverdeckte Flächen an (z.T. gepaart mit Lageabweichungen zwischen Maske und Datensatz)..... 226
- Abb. 6.4: Veränderungsanalyse der vegetationsfreien Waldflächen für die TM-Szenen vom 01.05.1986 und 17.05.1986. Fälschlicherweise wird eine Abnahme (rot im Veränderungsbild rechts) der klassifizierten vegetationsfreien Bereiche für die Umgebung der Autobahnabfahrt diagnostiziert. Die scheinbare Veränderung wird durch die harmonisierten Intensitätswerte der Szene vom 17.05.1986 hervorgerufen. Die Vegetation ist zu diesem Zeitpunkt deutlich vitaler als Anfang Mai. Ihr Einfluß auf die Grauwertveränderungen im Zuge der Pixelvervielfachung ist somit größer..... 226
- Abb. 6.5: Schattensäume und kräftig grün reflektierende Bereiche der Kategorie „Grünland“ für das Color-Luftbildmosaik werden über die Klassifikationsansätze z.T. nicht erfaßt (klassifiziertes Bild rechts: schwarze Bereiche)..... 227
- Abb. 6.6: Fehlklassifizierung von Nadelwald- und Ackerflächen durch stark abweichendes, „untypisches“ Reflexionsverhalten von Teilflächen, die folglich der Unterklasse „verschattete Bereiche“ zugeordnet werden (Klassifizierung von nadelwalddominierten Flächen: unten links dunkelgrün; von Ackerflächen: unten rechts hellgrün; verschattete Bereiche jeweils in dunkelgrau, schwarze und hellgraue Areale: nicht definiert bzw. nicht klassifiziert)..... 228

Abb. 6.7:	Klassifizierung von Vegetation als Wasserfläche für die Kategorie „Gewässer“ des Luftbildmosaiks von 1990 (blau, rechts). Die Fehlklassifizierung wird erst durch leichte Lageabweichungen zwischen Maske und Bildmosaik aufgedeckt.....	229
Abb. 6.8:	Fehlklassifikation von Nadelwald als Wasserfläche im Rahmen der Klassifikation der Kategorie „Gewässer“ für die Landsat TM-Szene vom 01.05.1986 (vgl. blaue Fläche im Bereich des Fadenkreuzes im klassifizierten Bild rechts).....	229
Abb. 6.9:	TM-Szenen vom 01.05., 17.05.1986 und 02.07.1991 in chronologischer Reihenfolge links (von oben nach unten), rechts dazu die Klassifikationen der nadelwalddominierten Bereiche (Variationen an Grüntönen stellen nadelwalddominierte Flächen mit verschiedenen Vitalitätsgraden dar)	230
Abb. 6.10:	Ergebnis der Veränderungsanalysen für den gleichen Bildausschnitt wie bei Abb. 6.9: 01.05.1986 zu 17.05.1986 links, 17.05.1986 zu 02.07.1991 rechts: rot gefärbt sind Areale, in denen die als nadelwalddominierte klassifizierten Flächen zurückgegangen bzw. weggefallen sind, grün gefärbt sind Flächen, für die Nadelwaldareale klassifiziert werden.....	231
Abb. 6.11:	Fehlklassifizierungen von Hausdächern links; rechts: Klassifizierung als „Übergang nicht vital-vital“ (olivgrün) bzw. „vegetationsverdeckt“ (grün) oder „verschattet“ (dunkelgrau).....	232
Abb. 6.12:	Einfluß der unterschiedlichen Lage und Ausdehnung verschatteter Flächen auf die Flächenbilanzierung im Zuge der Veränderungsanalyse: Beispiel Kategorie „Grünland: vegetationsverdeckt“ (grün gefärbte Bereiche in den beiden klassifizierten Bildern oben rechts; dunkelgrau gefärbte Flächen: verschattet). Die Veränderungsanalyse diagnostiziert Zu- und Abnahmen von vegetationsverdeckten Flächen aufgrund veränderter Schatten (Bild unten, rot und grün eingefärbte Areale)..	233

## Kartenverzeichnis

Karte 2.1:	Der Untersuchungsraum.....	28
Karte 2.2:	Die pnV im Untersuchungsraum.....	30
Karte 5.1:	Kategorie Grünland: wissensbasierte Klassifizierung Datengrundlage: Landsat TM-Szene vom 01.05.1986.....	192
Karte 5.2:	Kategorie Grünland: wissensbasierte Klassifizierung Datengrundlage: Landsat TM-Szene vom 17.05.1986.....	193
Karte 5.3:	Kategorie Grünland: wissensbasierte Klassifizierung Datengrundlage: Landsat TM-Szene vom 02.07.1991.....	194

Karte 5.4: Synthesekarte der Einzelklassifikationen. Datengrundlage: Landsat TM-Szene vom 02.07.1991 .....	202
Karte 5.5: Klasse Grünland: vegetationsbestanden: Veränderungsanalyse Datengrundlage: Landsat TM-Szenen vom 17.05.1986 und 02.07.1991 .....	213

### Tabellenverzeichnis

Tab. 2.1: Verwendete Luftbilddatensätze.....	35
Tab. 2.2: Verwendete Satellitenbilddatensätze.....	35
Tab. 2.3: Ausstattung mit Hard- und Software.....	37
Tab. 3.1: Charakterisierung der digitalen Luftbilddatensätze.....	51
Tab. 3.2: Luftbildmosaik vom 25.07.1985: radiometrische Eigenschaften.....	52
Tab. 3.3: Luftbildmosaik vom 05.05.1990: radiometrische Eigenschaften.....	53
Tab. 3.4: Vergleichende Gegenüberstellung der vorgestellten komplexen Näherungsverfahren.....	67
Tab. 3.5: Vergleich der untersuchten Verfahren zur Verbesserung der Detailschärfe geocodierter Fernerkundungsdatensätze.....	90
Tab. 4.1: Der Pearsonsche Korrelationskoeffizient für die Ratios sowie die Kanäle Grün und Rot des Landsat TM-Bild-Ausschnitts vom 02.07.1991.....	106
Tab. 4.2: Der Pearsonsche Korrelationskoeffizient für die Ratios sowie die Kanäle Grün und Rot des CIR-Luftbildes vom 24.07.1985: empirisch ausgewählte Stichproben.....	107
Tab. 4.3: Rekodierung der Klassen des CIR-Luftbildmosaiks auf die Klassen des Color-Luftbildmosaiks.....	137
Tab. 4.4: Rekodierung der Klassen der TM-Szenen für die Klassen der Kategorien „Grünland“ und „Wald“.....	138
Tab. 5.1: Klassifikatordesign für das CIR-Luftbildmosaik.....	156
Tab. 5.2: Klassifikatordesign für das Color-Luftbildmosaik.....	159
Tab. 5.3: Klassifikatordesign für die Landsat TM-Szenen vom 01.05.1986, 17.05.1986 und 02.07.1991.....	162
Tab. 5.4: Klassifikatordesign für die Kategorie „Wald“ der drei Landsat TM-Szenen vom 01.05.1986, 17.05.1986 und 02.07.1991.....	164
Tab. 5.5: Gegenüberstellung der Spezifikationen der Eingangsvariablen für die Kategorie „Wald“ der drei Landsat TM-Szenen.....	164

	Seite
Tab. 5.6: Klassifikatordesign für die Landsat MSS-Szene vom 02.07.1991.....	166
Tab. 5.7: Vergleich der Klassen, in denen die Schwellenwerte für die Reflexion in Grün, Rot und NIR zur Definition der Eingangsvariablen benutzt werden; Landsat TM- und -MSS-Szene vom 02.07.1991.....	167
Tab. 5.8: Flächendifferenzen der Kategorie Mischnutzung: CIR- zu Color-Luftbildmosaik.....	175
Tab. 5.9: Flächendifferenzen der Kategorie Wasserflächen: CIR- zu Color-Luftbildmosaik.....	176
Tab. 5.10: Flächendifferenzen der Kategorie Straßenflächen: CIR- zu Color-Luftbildmosaik.....	177
Tab. 5.11: Flächendifferenzen der Kategorie Grünland: CIR- zu Color-Luftbildmosaik.....	177
Tab. 5.12: Flächendifferenzen der Kategorie Ackerflächen: CIR- zu Color-Luftbildmosaik.....	178
Tab. 5.13: Flächendifferenzen der Kategorie Nadelwald: CIR- zu Color-Luftbildmosaik.....	179
Tab. 5.14: Flächendifferenzen der Kategorie Laubwald: CIR- zu Color-Luftbildmosaik.....	180
Tab. 5.15: Flächendifferenzen der Kategorie Gewässer: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	184
Tab. 5.16: Flächendifferenzen der Kategorie Wohnbauflächen: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	184
Tab. 5.17: Flächendifferenzen der Kategorie Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	186
Tab. 5.18: Flächendifferenzen der Kategorie Schleusenbauwerke: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	187

	Seite
Tab. 5.19: Flächendifferenzen der Kategorie Fläche: vegetationslos bzw. unbestimmbar: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	187
Tab. 5.20: Flächendifferenzen der Kategorie Bahnanlagen, Unter- und Überführungen: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	188
Tab. 5.21: Flächendifferenzen der Kategorie Freizeitbedarf: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	189
Tab. 5.22: Flächendifferenzen der Kategorie Gartenland/Sonderkulturen: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	190
Tab. 5.23: Flächendifferenzen der Kategorie Grünland: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	195
Tab. 5.24: Flächendifferenzen der Kategorie Ackerland: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	196
Tab. 5.25: Flächendifferenzen der Kategorie Heide, Moor, Moos: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	197
Tab. 5.26: Flächendifferenzen der Kategorie Wald (laubwalddominiert): Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	199
Tab. 5.27: Flächendifferenzen der Kategorie Wald (nadelwalddominiert): Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	200

Tab. 5.28: Flächendifferenzen der Kategorie Gehölz/nasser Boden: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	201
Tab. 5.29: Flächendifferenzen der Kategorie Flächen mit besonderer funktionaler Bedeutung: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts).....	201
Tab. 5.30: Internetadressen zur Recherche von Fernerkundungs- und Kollateral-daten .....	220
Tab. 7.1: Einrichtungsgegenstände und Anschaffungskosten.....	236
Tab. 7.2: Softwareausstattung und Preisbeispiele.....	236
Tab. 7.3: Exemplarische Preisliste für Daten (Größe des Untersuchungsgebiets: ca. 200km <sup>2</sup> ).....	237
Tab. 7.4: Arbeiten und angesetzte Arbeitszeiten.....	237
Tab. 7.5: Empfohlene Zuteilung der Arbeiten nach Qualifikation gemäß HOAI (1996)	237
Tab. 7.6: Kostenrechnung der einzelnen Arbeiten.....	238

## Abkürzungsverzeichnis

5S	Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
6S	Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
abs.	absolut
AFRICOVER	Land Cover Database and Map of Africa
AIDA	A System for the knowledge based Interpretation of Remote Sensing Data
AOI	area of interest
ASCII	American Standard Code for Information Interchange
ATCOR	Atmospheric Correction (Modell zur atmosphärischen Korrektur)
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
Aufl.	Auflösung
AVHRR	Advanced Very High Resolution Radiometer (NOAA-Sensor)
BI	Brightness Index
BMBF	Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz
CCRS	Canada Centre of Remote Sensing
CIR	Colorinfrarot
CORINE	Co-Ordinated Information on the Environment in the European Community
CP	Colorprinter
CWH	Chemische Werke Hüls
DG	Dienstleistungsbereich Geoinformationsbearbeitung (Abteilung der DSK, Bottrop)
DGK	Deutsche Grundkarte
DGLR	Deutsche Gesellschaft für Luft- und Raumfahrt
DGM	Digitales Geländemodell
Diagr.	Diagramm
DIN	Deutsche Industrie-Norm
DLM	Digitales Landschaftsmodell
DLR	Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt
DMT	Deutsche Montan Technologie GmbH
DN	Digital Number
DOS	Disk Operation System (Betriebssystem PC)
DOS Methode	Dark-Object-Subtraction Methode
dpi	dots per inch
DSK	Deutsche Steinkohle AG
DWD	Deutscher Wetterdienst
EASI PACE	Expert Analysis System Interface/ Picture Analysis Correction and Enhancement (kommerzielle Fernerkundungssoftware)
EDBS	Einheitliche Datenbankschnittstelle
EDBSARC- Schnittstelle	EDBS-ArcInfo-Schnittstelle
EG	Europäische Gemeinschaft
EPA	Environmental Policy Act (USA)
ERDAS	Earth Resource Data Analysis Software (ERDAS Imagine: kommerzielle Fernerkundungs- software)
ERNEST	Erlanger semantisches Netzwerk System
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EU	Europäische Union
FAW	Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung
FMP	Flugzeugmeßprogramm

FOV	Field of View
FRA	Forest Resources Assessment
GCP	Ground Control Point
GEMS	Global Environmental Monitoring System
GIS	Geographisches Informationssystem
GISIS	Graphical Interface to the Intelligent Satellite Information System
GK	Gauß-Krüger
GLA	Geologisches Landesamt
GRASS	Geographic Resource Analysis Support System (kommerzielle Fernerkundungs- und GIS-Software)
GRID	Global Resource Information Database
GTOS	Global Terrestrial Observing System
GVI	Green Vegetation Index
H	Hypothesenebene
HK	Hauptkomponente; in Anlehnung an englischsprachige Abk.: PC=Principal Component
HKT	Hauptkomponententransformation; in Anlehnung an englischsprachige Abk.: PCA=Principal Component Analysis
HOAI	Honorarordnung für Architekten und Ingenieure
HW	Hochwert
i.d.R.	in der Regel
ICARE	Image Cartography Expert
IDRISI	kommerzielle GIS-Software (ursprüngl.: Idrisi, Al, Abu Abd Allah Muhammed Ibn Muhammad, 1100 - 1165, arab. Geograph)
IFOV	Instantaneous Field of View
IHS	Intensity, Hue, Saturation (Intensitäts-Farbfrequenz-Farbsättigungs-Raum)
IKONOS	Sensor; Bezeichnung abgeleitet aus dem Griechischen: "Bild"
IR	Infrarot
IRS	Indian Remote Sensing Satellite
ISODATA	Iterative Self-Organising Data Analysis Technique
IT	Informationstechnologie
ITOS	Improved Tiros Operational Satellite System (NOAA-NESS)
IVU-Richtlinie	EG-Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung
J.	Jahr
JERS	Japan ERS (Earth Resources Satellite)
k.A.	keine Angabe
Komb.	Kombination
KVR	Kommunalverband Ruhrgebiet
LAI	Leaf Area Index
LDIAS	Landsat Digital Image Analysis System
LINFOS	Landschaftsinformationssystem (NRW)
LISS	Linear Imaging Self Scan (Sensor)
LOWTRAN	Low Resolution Transmission Code
LUT	Look up table
LVA	Landesvermessungsamt
MAB	Man and Biosphere (UNESCO-Programm)
MARS	Monitoring Agriculture with Remote Sensing
Max.	Maximum
MCE	Multi-Criteria-Evaluation
MESSR	Multispectral Electronic Self-Scanning Radiometer (MOS & LOS)
min	Minuten

Min.	Minimum
MIR	Mittleres Infrarot
MLP	Multi-Layer-Perception
MNDVI	Modified Normalized Difference Vegetation Index
MODTRAN	Moderate Resolution Transmittance (Nachfolgemodell von LOWTRAN)
monochrom., monochromat.	monochromatisch
MOS	Marine (Maritime) Observation Satellite (Japan)
MSS	Multi Spectral Scanner
MSU-E	Multispektralkamera auf der RESURS-Plattform
MSU-SK	Multispektralkamera auf der RESURS-Plattform
multisp., multispek.	multispektral
mü.NN	Meter über Normal Null
MWST	Mehrwertsteuer
n.Br.	nördliche Breite
NASA	National Aeronautics and Space Administration (USA)
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NIR	Nahes Infrarot
NN	Neuronales Netzwerk
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration (USA)
NRW	Nordrhein-Westfalen
ö.L.	östliche Länge
OD	Optische Dichte
OPS	Optischer Sensor, JERS
PAN	panchromatisch (Bezeichnung bei SPOT)
phys.	physikalisch
PMK	Multimediales, integriertes Programm zum Umweltmonitoring (Schwe-den)
pnV	potentiell natürliche Vegetation
R	Regelebene
r	Pearsonscher Korrelationskoeffizient
rad., radiometr.	radiometrisch
RBV	Return Beam Vidicon (ERTS oder LANDSAT 1 bis 3)
rel.	relativ
RESEDA	Remote Sensor Data Analysis
RESURS	russischer Satellit zur Erdkundung
RGB	Rot-Grün-Blau(-Raum)
RG-Index	Rot-Grün-Index
RMS	Root Mean Square
RW	Rechtswert
SAVI	Soil Adjusted Vegetation Index
SCSI	Small Computer System Interface
SENSAT	Sensor-Atmosphere-Target (Computermodell)
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre (Frankreich)
SRU	Der Rat von Sachverständigen für Umweltfragen
STA	Standardabweichung
SUP	Strategische Umweltprüfung
TACOR	Tasseled Cap Atmospheric Correction
TC, TC4	Tasseled Cap, Tasseled Cap, 4. Komponente
TIR	Thermalinfrarot
TIROS	Television & Infrared Observation Satellite (NOAA)

TM	Thematic Mapper (optisches Aufnahmesystem der LANDSAT-Plattform)
Top-NRW 50	Topographische Karte für NRW im Maßstab 1:50.000
TSAVI	Transformed Soil Adjusted Vegetation Index
UNCED	Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung
UNESCO	Organisation der Vereinten Nationen für Erziehung, Wissenschaft und Kultur
UTC	coordinated Universal Time
UVP	Umweltverträglichkeitsprüfung
UVPG	Gesetz über die Umweltverträglichkeitsprüfung
UVS	Umweltverträglichkeitsstudie
V	Variablenebene
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
WI	Wetness Index
WiFS	Wide Field Sensor
XS	multispektral (Bezeichnung bei SPOT)

The aim of science is to seek the simplest explanation of complex facts. We are apt to fall into the error of thinking that the facts are simple because simplicity is the goal of our quest. The guiding motto in the life of every natural philosopher should be „seek simplicity and distrust it“.

Alfred North Whitehead (1861-1947)

## 0 Vorbemerkungen

Die Erfahrungen haben immer wieder gezeigt, daß vor allem die Präsentation und Diskussion von Methoden sowie die Nachvollziehbarkeit der vorgestellten Verfahren von vorherrschendem Interesse sind. Dies ist für die vorliegende, gekürzte Veröffentlichung in der ursprünglichen, ausführlichen Form beibehalten worden, so daß die Nachvollziehbarkeit garantiert bleibt. Allerdings wurde aufgrund der Vorgaben für die Dateigröße der Veröffentlichung (maximal 50 MB) auf die ursprüngliche, gesamte Ergebnisdokumentation der Arbeit verzichtet. Hier dienen beispielhaft aufgeführte Ergebniskarten zur Veranschaulichung (s. Kap. 5). Falls dennoch Bedarf an weiterführenden, detaillierteren Informationen insgesamt oder auch zu den Ergebnissen besteht, kontaktieren Sie mich bitte unter folgender E-mailadresse: [c-lechtenboerger@web.de](mailto:c-lechtenboerger@web.de)

Das der Universitätsbibliothek der RUB zur Verfügung gestellte Ansichtsexemplar der Arbeit stellt die Papierversion dieser gekürzten Fassung dar. Da es vor allem Orientierungszwecken dienen wird, ist die Druckqualität – vor allem auch die der Abbildungen – nicht prioritär behandelt worden.

Bochum im Oktober 2001

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung und Thematik

Anthropogen induzierte Umweltveränderungen können akut auftreten oder sich über längere Zeiträume „schleichend“ entwickeln, wobei sie eine Eigendynamik zeigen, wie z.B. Pioniervegetationsformen und deren Folgegesellschaften auf Industriebrachen, Grundwasserverschmutzung durch langjährige Schadstoffeinträge aus Düngemitteln oder ähnliches. Veränderungen werden dann oft erst Jahre später „plötzlich“ erkennbar.

Zur Vermeidung oder Verminderung negativer Umwelteinflüsse sind im Laufe der Zeit verschiedene Instrumente des Umweltschutzes implementiert worden, wobei der Akzent zunehmend auf der Vorsorge liegt; häufig geschieht dies in Kombination mit der Nachsorge und der Beweissicherung vorangegangener Eingriffe oder Maßnahmen mit negativen Umweltauswirkungen. Schwerpunkte von Vorsorgemaßnahmen sind Monitoringverfahren, um die Entwicklung der Umwelt zu beobachten. Durch eine stetige Beobachtung sollen Trends registrierbar und Frühwarnsysteme installiert werden, um auf Basis dieser kontinuierlichen Informationen Prognosen über zukünftige Entwicklungen so präzise wie möglich werden zu lassen. Das bedeutet, daß Veränderungen vorhersagbar werden und auch aktiv durch Eingriffe verändert oder umgelenkt werden können, so daß die Regenerationsfähigkeit und Leistungsfähigkeit der Umwelt trotz bestehender Belastungen erhalten werden kann. Umweltmonitoringprogramme sind in diesem Zusammenhang etablierte Instrumente für Arbeiten auf lokaler, regionaler, nationaler und internationaler Ebene.

Da bestehende Umweltmonitoringverfahren und integrierte Methoden Schwachpunkte wie z.B. ein ungünstiges Kosten-Nutzen-Verhältnis, Probleme mit Erhebungszeiträumen oder den Konflikt Punkt- zu Flächendaten und damit der Inter- und Extrapolation aufweisen, erscheint der Einsatz von Fernerkundungsdaten als wesentlicher, komplementärer Baustein für ein Umweltmonitoringverfahren geboten. Die Nutzung von Fernerkundungsdaten kann bestehende Probleme minimieren und den Arbeitsprozess sowie die Qualität der Resultate optimieren.

Fernerkundungsdaten kommen heute schon in den verschiedensten Monitoringprogrammen zur Anwendung, werden jedoch meist nicht in ihrer gesamten Informationsfülle ausgeschöpft (s.u.; EUROPEAN SPACE REPORT VERLAG 1993). Vielfach werden sie nur als attraktiver Bestandteil der Ergebnispräsentation genutzt, da sie optisch sehr ansprechend sind. Dies führt häufig zu einer Fehleinschätzung der Einsatzmöglichkeiten von Fernerkundungsdaten (vgl. auch KLEUTER 1997, S. 9 ff.; EHLERS 1995, S. 36 ff.).

Ziel der vorliegenden Studie ist, die methodenkundlich-technischen Vorteile der Nutzung von Fernerkundungsdaten für ein Umweltmonitoring herauszuarbeiten, indem anhand eines Beispielraumes Möglichkeiten der Qualitätsoptimierung durch den Einsatz von Fernerkundungsdaten entwickelt werden. Ein wesentlich auf Fernerkundungsdaten basierendes

Umweltmonitoring kann dann z.B. im Rahmen der Bemühungen um ein „sustainable development“ auf lokaler, regionaler, nationaler oder globaler Ebene zum Einsatz kommen. Die Arbeit gliedert sich hierzu in verschiedene Themenkomplexe. Nachfolgend wird der Stand der Forschung für Umweltmonitoringverfahren sowie der bisherige Einsatz von Fernerkundungsdaten für Fragen des Umweltmonitorings skizziert und hergeleitet. Im Anschluß daran werden die Einzelziele der vorliegenden Studie formuliert. Anschließend werden die Rahmenbedingungen, unter denen die Arbeit durchgeführt wird, erläutert. Daran schließt sich die Vorverarbeitung und die Analyse der Fernerkundungsdaten an. Zunächst werden Empfehlungen für ein operationelles Verfahren gegeben, bevor eine Kosten-Nutzen-Analyse erfolgt. Die Arbeit schließt mit einem Ausblick auf mögliche zukünftige Forschungsfelder ab.

## 1.2 Forschungsstand im Bereich Umweltmonitoring

### 1.2.1 Der Begriff Umweltmonitoring

Unter „ökologischer Umweltbeobachtung“ bzw. „Umweltmonitoring“ versteht der SRU „eine Aktivität, die das System Umwelt als Ganzes erfassen und die einzelnen Umweltsektoren oder Umweltmedien wie Luft, Wasser, Böden, Pflanzen- und Tierwelt ... übergreifen muß. Es handelt sich also um eine integrierende Umweltbeobachtung auf ... ökosystemarer Grundlage, weil sie wesentlich auf der Einteilung der Umwelt in Ökosysteme ... beruht und daher intensiv mit der sich zur Zeit intensiv entwickelnden Ökosystemforschung verbunden werden sollte“ (SRU 1991, S. 7; vgl. auch SCHÖNTHALER & KÖPPEL 1999, S. 23 ff.; PEITHMANN 1996, S. 191 f.).

Mit Hilfe der Arbeiten von PLACHTER (1991) und MAAS (1999) läßt sich der Begriff „Umweltmonitoring“ bzw. „ökologische Umweltbeobachtung“ umfassend definieren. Die Erklärungsansätze der beiden Autoren sind jedoch wie viele andere auch auf einige Aspekte des Themas reduziert, um Unterschiede und Stoßrichtungen der einzelnen Begriffe herausstellen zu können.

PLACHTER geht zunächst von dem Vorgang der Dauerbeobachtung aus (er verwendet den Begriff synonym mit Monitoring), der nur aus Meß- und Beobachtungsvorhaben besteht; diese ermitteln Daten über

- eindeutige und reproduzierbare Methoden,
- ohne absehbare zeitliche Begrenzungen,
- kontinuierlich.

PLACHTER sieht für die Dauerbeobachtung zwei Aufgabenbereiche:

1. Ermittlung wissenschaftlicher Erkenntnisse,
2. Umwelt-Überwachungsprogramme:
  - allgemeines Umweltmonitoring (Frühwarnsysteme),

- spezifische Überwachungsprogramme (Schadstoffe, Erfolgskontrolle von Naturschutzmaßnahmen etc.).

Während der erste Bereich das Ziel hat, Wirkungszusammenhänge und Abläufe von Entwicklungen und Veränderungen in der Umwelt zu erforschen und wissenschaftlich relevante Daten bereitzustellen, konzentriert sich der zweite Komplex darauf, Veränderungen auf gezielte Fragestellungen hin zu überwachen sowie Erfolge von Umweltschutzmaßnahmen zu dokumentieren und zu kontrollieren (PLACHTER 1991, S. 19 ff.).

Die nach Punkt 2 festgesetzten Aufgaben und Ziele eines Monitoringprogramms decken sich damit im wesentlichen mit den im angelsächsischen Raum verbreiteten Begriffsinhalten und Aufgaben eines solchen Programms. Hiermit ist aber nur ein Teilaspekt (Punkt 2.) der in Deutschland geführten Begriffsdefinition abgedeckt (s. hierzu MAAS 1999, S. 48; HELLAWELL 1991).

MAAS konzentriert sich bei der Herleitung der Definition des Begriffs Umweltmonitoring auf die oben skizzierten Begriffe Dauerbeobachtung/Monitoring und Monitoring im Sinne der Überwachung, ohne sich dabei auf spezifische Überwachungsprogramme nach Punkt 2 gemäß PLACHTER zu beschränken. Dabei stellt er mehrere Aspekte eines Umweltmonitorings nebeneinander, um die verschiedenen Facetten und Ziele besser herausstellen zu können:

- Veränderungen des Umweltsystems sollten auch ohne direkten Ursache-Wirkungs-Bezug angezeigt werden und dadurch repräsentative Aussagen über den Zustand der Umwelt sowie dessen Veränderung ermöglichen (Bereich Erforschung von Wirkungszusammenhängen).
- Regelmäßige oder unregelmäßige Beobachtungen sollten je nach Methode und in Abhängigkeit der Beobachtungsobjekte (Individuen, Kompartimente des Umweltsystems) mit oder ohne zeitliche Begrenzung durchgeführt werden.
- Es sollte soweit wie möglich unterschieden werden nach natürlichen, direkt oder indirekt anthropogen induzierten Veränderungen im Umweltsystem.
- Aussagen über die Wirksamkeit und Notwendigkeit von politischen Maßnahmen oder Managementmaßnahmen für einen Untersuchungsraum sollten ermöglicht werden (vordefinierte Umweltqualitäten, Erfolgskontrolle).
- Insgesamt wissenschaftlich richtige, nachvollziehbare und gesicherte Aussagen, die über reproduzierbare Methoden entstanden sind, sollten ableitbar sein (Kontinuität).
- Über das reine Beschreiben hinaus sind Ansätze für Bewertungen (Ist-Soll) erwünscht (MAAS 1999, S. 49).

Insgesamt kristallisieren sich daraus drei Anwendungsbereiche für das Umweltmonitoring heraus, die sich nicht immer scharf voneinander trennen lassen und häufig sogar ineinander greifen; zum besseren Verständnis sind sie hier getrennt aufgeführt:

- Entwicklung und Veränderung,
- Umweltverschmutzung und -belastung,
- Kontrolle und Überwachung mit Ahndung bei Unterlassung, Fehlverhalten o.ä.

### Fernerkundliches Umweltmonitoring im Sinne dieser Forschungsarbeit

Ausgehend von den vorgenannten Definitionen wird Umweltmonitoring in dieser Arbeit wie folgt verstanden:

Die Studie versucht im Rahmen dessen, was ein fernerkundlich gestütztes Umweltmonitoring leisten kann, der Forderung des SRU (1991, S. 7) nach einem ganzheitlichen, medienübergreifenden Umweltmonitoring gerecht zu werden. Hierzu wird die Vegetation in der exponierten Rolle des medienübergreifenden integralen Indikators genutzt. Sie wird in ihrer Indikatorfunktion für die verschiedenen Umweltbereiche wie Boden, Wasser etc. verwendet (vgl. Indikatoransatz in der Fernerkundung: Kap. 4.2; vgl. auch die Ausführungen von SEGER & MANDL 1994, S. 34 ff.; PILLMANN & KLAR 1995, S. 543 ff.). Die Vegetation wird im Rahmen der vorliegenden Monitoringstudie mit Hilfe von Fernerkundungsdaten in annähernd regelmäßigen Zeitabständen untersucht, ohne die Wirkungszusammenhänge insgesamt erforschen zu wollen (s.o.). Die gewonnenen Erkenntnisse über Veränderungen sind nicht zielgerichtet im Sinne einer Überwachung, Nachkontrolle oder Wirkungskontrolle nach PLACHTER (1991, S. 7 ff.), sondern sollen zu repräsentativen Aussagen über den Zustand der Umwelt und deren Veränderungen führen. Diese Informationen werden dann im Rahmen von Umweltmonitoringprogrammen z.B. für Entscheidungsprozesse bereitgestellt. Die entwickelten fernerkundlichen Methoden und Techniken sind reproduzierbar und ermöglichen wissenschaftlich richtige, nachvollziehbare und gesicherte Aussagen.

Im Endergebnis sollen diese dann mit bestehenden landschaftsökologisch ausgerichteten Monitoringtechniken und -methoden zu einem neuen, effizienten und praxisorientierten Monitoringprogramm - auch für die Überwachung, Effizienz-, Nach- oder Wirkungskontrollen - kombiniert werden, in dem die Fernerkundungsdaten eine entscheidende Rolle spielen werden (s. Kap. 4.2, 5. vgl. auch SEGER & MANDL 1994, S. 34 ff.; PILLMANN & KLAR 1995, S. 543 ff.).

### 1.2.2 Umweltmonitoring: Umsetzung und Durchführung

In Anlehnung an schweizerische Konzepte (Schweizerisches Naturschutzgesetz 1987) stellte der SRU (1991) in seinem Gutachten folgende Anforderungen an die integrierende Umweltbeobachtung:

- kontinuierliche und systematische Erhebung des Zustandes eines Raumes bezüglich der Atmo-, Hydro-, Pedo- und Biosphäre sowie der Anthroposphäre,
- Aufdeckung vorhandener Schäden, frühzeitige Entdeckung und Erfassung neuer Schäden,
- Aufzeigen von Forschungslücken, so daß entsprechende Projekte initiiert werden und ein interdisziplinäres Diskussionsforum sowie eine Koordinationsebene geschaffen werden können,
- kontinuierliche und allgemein verständliche Veröffentlichung der Beobachtungsergebnisse (SRU 1991, S. 27).

Um diese Vorgaben zu erfüllen, werden in der Fachwelt sich ähnelnde Verfahren und Arbeitsabläufe vorgestellt. Einen akzeptablen Ansatz liefern WOLFF-STRAUB et al. (1996, S. 12 ff.). Der Monitoringablauf nach STÖHR (verändert nach SUKOPP et al. 1986, S. 27 ff.; WARD et al. 1986, S. 291 ff. und FUGMANN et al. 1987) bietet jedoch einen umfassenderen, klarer gegliederten Ablauf (vgl. Abb. 1.1).

SPELLERBERG (1991, S. 182) erweiterte den Ablauf von STÖHR (1989, S. 123 ff.), der in seinem wesentlichen Ablauf in der Literatur stets wiederkehrt, um entscheidende Aspekte zu den Punkten 1. und 2. (siehe Abb. 1.2). Auch bei ihm fallen Schlüsselbegriffe wie Zieldefinition, Standortauswahl von Beobachtungsflächen/-punkten, Organisation und Logistik, Verfahren, Bewertungsmethoden etc. Beachtenswert an seinem Modell ist, daß er den Punkt der Datenaufnahme hervorhebt, da dies häufig ein Schwachpunkt beim Monitoring ist (Parameter- und Methodenauswahl s.u.).

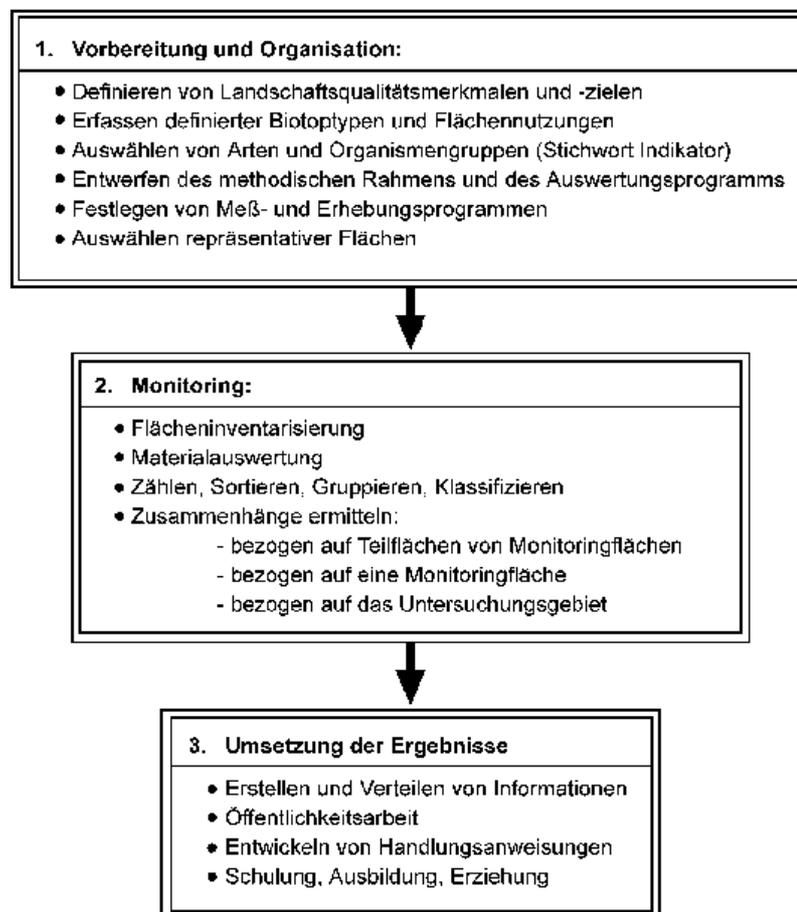


Abb. 1.1: Monitoring: Arbeitsablauf nach STÖHR (1989, S. 123 ff.; vgl. auch HAKES 1996)

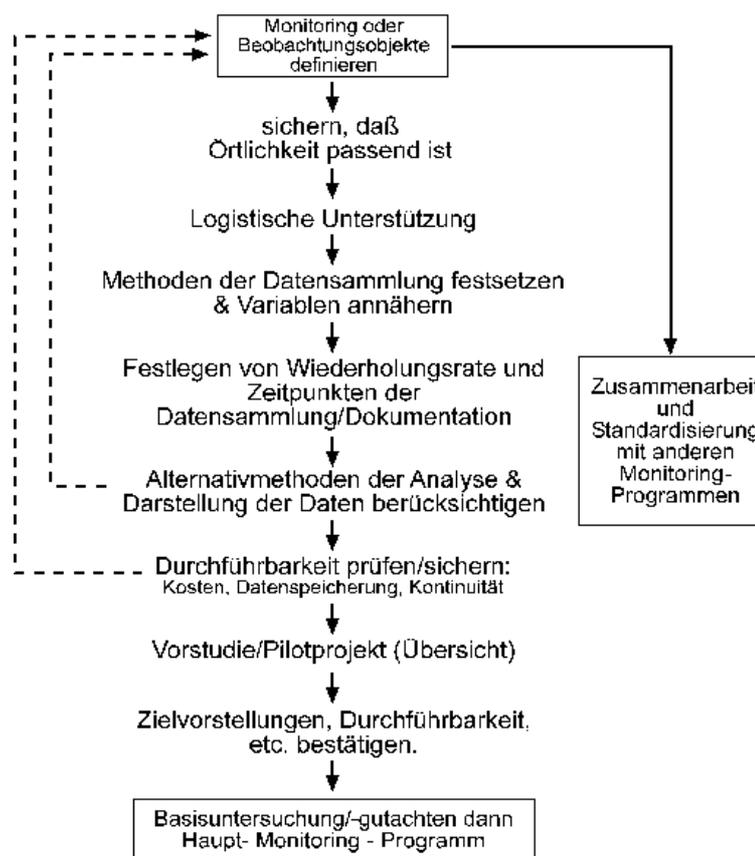


Abb. 1.2: Monitoring: Arbeitsablauf nach SPELLERBERG (1991, S. 182), verändert

Während der Durchführung eines Monitorings sollten nach SPELLERBERG (1991) Kontrollpunkte zwischengeschaltet werden. Hierüber wird ein stetiges „feed-back“ zu Zielvorgaben, Methodenauswahl etc. etabliert. Durch dieses iterative Vorgehen wird die Effizienz und Zielorientierung eines Monitorings gesichert. Mit Hilfe der Prüfung von Kollateralquellen, einer Machbarkeitsstudie und einem „Vorab“-Monitoring („Pilot-Studie“) können Probleme während der Planungsphase aufgedeckt und behoben werden.

In Anlehnung an das Verfahrensmodell von SPELLERBERG wird in der vorliegenden Arbeit ein modifiziertes Ablaufschema für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für ein Umweltmonitoringverfahren entwickelt (vgl. Abb. 1.3).

Die Analysen der verschiedenen Fernerkundungsdaten werden bezogen auf das jeweilige geometrische Auflösungsvermögen der Daten durchgeführt und bewertet. Die Verwendbarkeit der Resultate für Studien in verschiedenen Maßstabsebenen wird geprüft.

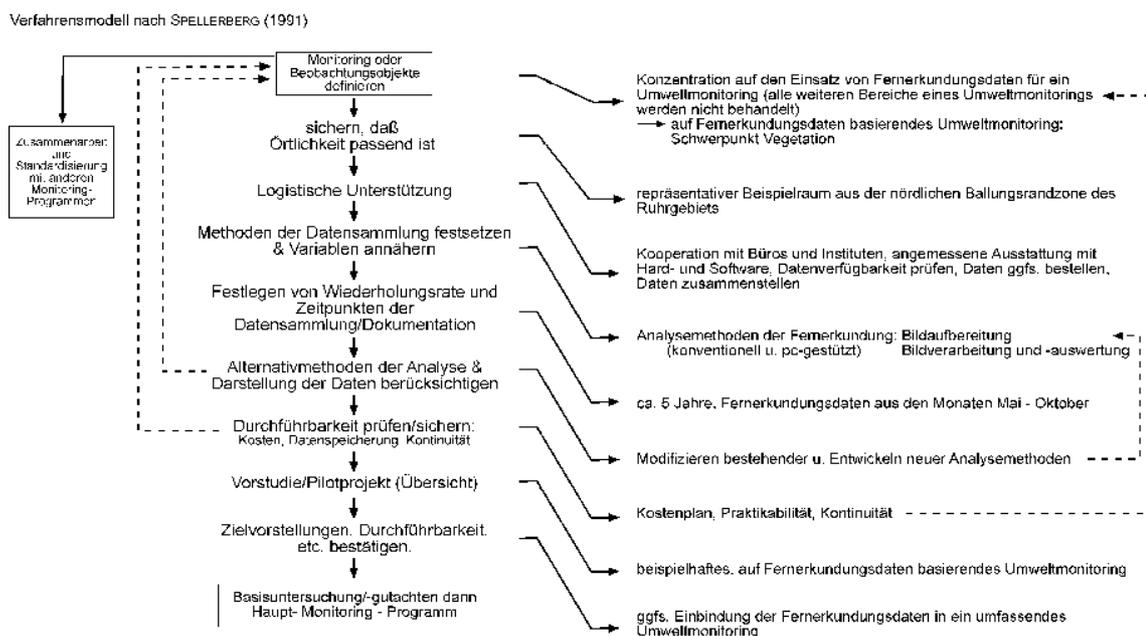


Abb. 1.3: Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten in der vorliegenden Studie. Quelle: SPELLERBERG (1991), modifiziert

Der Komplex „Analysemethoden der Fernerkundung“ verkörpert den methodischen Schwerpunkt der Arbeit (vgl. Abb. 1.3). Er gliedert sich in die Datenvorprozessierung und Datenanalyse. Hierzu werden verschiedene Fernerkundungstechniken getestet, geprüft und eingesetzt (z.B. Ansätze zur Verbesserung der Detailschärfe in Satellitenbilddaten, verschiedene Indizes).

Im folgenden wird der Einsatz der Fernerkundungsdaten für Fragen des Umweltmonitorings historisch hergeleitet. Zudem wird dokumentiert, inwieweit Fernerkundungsdaten in Umweltmonitoringverfahren bereits eingesetzt werden und welche weiterführenden Anwendungsmöglichkeiten bestehen.

### 1.3 Umweltmonitoring und Fernerkundung

Abbildung 1.4 dokumentiert den aktuellen Stand des Arbeitsprozesses dieser Studie:

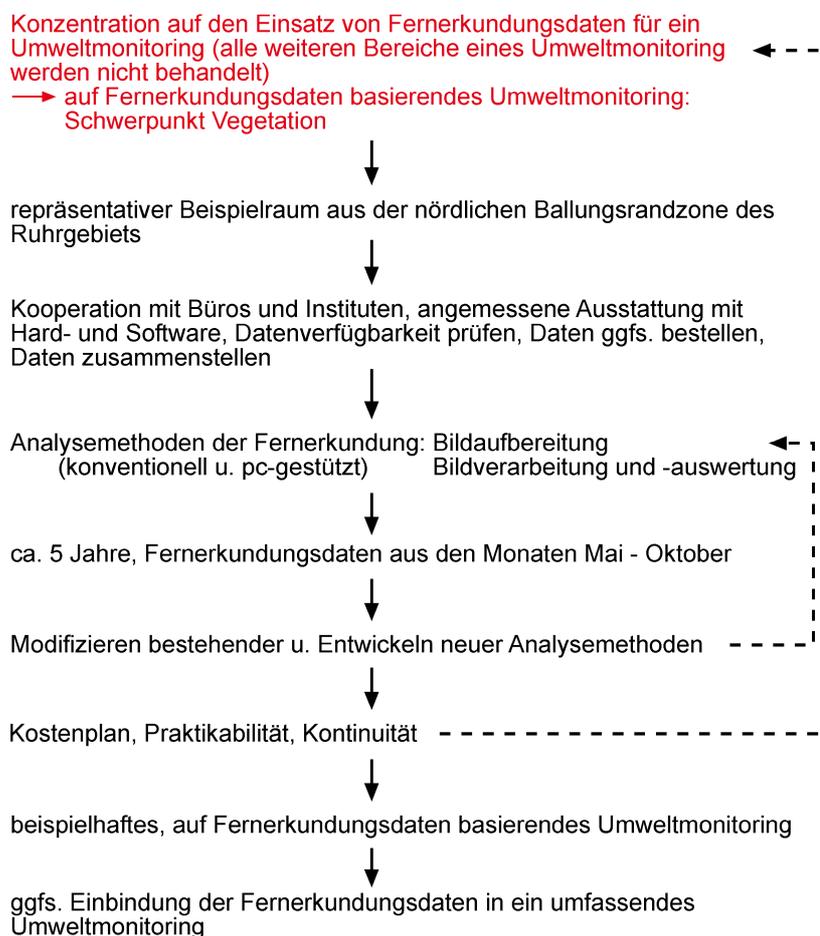


Abb. 1.4: Beispielhaftes Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme

Der Einsatz von Fernerkundungsdaten zunächst für allgemeine geographische Fragestellungen reicht bis in das 19. Jahrhundert zurück (1858: Ballonbilder Tournachons; TROLL 1942, S. 71). CARL TROLL (1966) gibt in mehreren Aufsätzen aus den Jahren 1939-1963 einen umfassenden Überblick über Einsatzfelder von Luftbildern in der Geographie. Ausgehend von ersten Nutzungen der Luftbilder für militärische Zwecke (österreichisch-italienischer Krieg 1859, amerik. Bürgerkrieg 1861-1865 per Ballonaufnahme: vgl. auch EWALD 1920, S. 1) wurden innerhalb kurzer Zeit auch die wissenschaftlich ausgerichteten Verwendungsmöglichkeiten der Luftbilder erkannt. Erste Einsatzgebiete für die Luftbildauswertung lagen damals neben militärischen Operationen vor allem in der Erkundung von Kolonialgebieten in Afrika und Indien. Fehlende Karten, schwer zugängliches Gelände und große Entfernungen begründeten diese auf Luftbildern basierenden Bestandserhebungen. Schon damals erkannte TROLL die niedrigen Kosten sowie den geringen Zeit- und Arbeitsaufwand der Luftbildauswertung

im Vergleich zu konventionellen terrestrischen Verfahren als großen Vorteil (TROLL 1939, S. 28).

Die Bildauswertung konzentrierte sich zu dieser Zeit im wesentlichen auf geologische, bodenkundliche, hydrologische und vegetationskundliche Fragestellungen. Der Vegetation wurde ein besonderer Stellenwert beigemessen, da sie aufgrund ihrer Verbreitung, Ausprägung und ihres Zustandes häufig als Indikator für die oben genannten Themenbereiche diente und dienen mußte; die Vegetation verdeckt im Luftbild häufig die direkte Sicht auf geologische Formationen, Bodenfarbe und -feuchte sowie Gewässervorkommen und -strukturen. Sie erlaubt allerdings über ihre Verbreitung und die jeweiligen Vitalitätszustände Rückschlüsse auf die nichtsichtbaren genannten Phänomene, da Wechselwirkungen zwischen der Vegetation und geologischen, pedologischen und hydrologischen Verhältnissen etc. bestehen. Für TROLL war diese „Indikatorfunktion“ nicht nur notgedrungen gegeben: „Die breiteste Anwendbarkeit hat die Luftbildforschung zweifellos auf dem Gebiete der Vegetation .... Außerdem ist dieser Zweig auch der wichtigste.“ (TROLL 1939, S. 25; vgl. S. 38, 67). Darüber hinaus wurde die Vegetation in ihrer „Indikatorfunktion“ zur Erfassung von Raumstrukturen, die mit der Ökologie bzw. der Landschaftsökologie in Zusammenhang stehen, benutzt. Nach TROLL lieferten Luftbilder folglich einen wichtigen Beitrag zum Verständnis der „Raumökologie der Erdoberfläche“ (TROLL 1939, S. 67).

Laut TROLL setzte sich diese Erkenntnis etwa zeitgleich auch in der Luftbildforschung der Sowjetunion durch, die er als wegweisend für die damalige Entwicklungsphase dieses Wissenschaftszweiges einstuft. Havemann, von TROLL als wichtige Forscherpersönlichkeit der UdSSR eingestuft, spricht in diesem Zusammenhang von „Luftlandschaften“ (TROLL 1943, S. 124).

Etwa zur gleichen Zeit etablierte sich der Einsatz von Luftbildern für die Forstwirtschaft und -wissenschaft in den USA, Kanada, Schweiz, Italien und Deutschland. Untersuchungsschwerpunkt war die Bestandserhebung (Alter, Höhe, Dichte, Schaden durch Windwurf, Insekten etc.: TROLL 1939, S. 26 f.).

Obwohl TROLL die herausragende Hilfestellung durch die Luftbildauswertung erkannte, war ihm bewußt, daß konventionelle Erhebungs- und Analyseverfahren durch sie nicht verdrängt werden würden: „Nicht, daß das Luftbild etwa die terrestrische Feldforschung ersetzen sollte! Davon kann keine Rede sein.“ Für ihn waren Luftbilder zusätzliche Informationsquellen, die die Arbeiten effizienter machten und qualitativ verbesserten (TROLL 1939, S. 3). Neben der Fortführung bestehender Kartenwerke und Bestandsaufnahmen mit Hilfe der Luftbildauswertung gab es bei TROLL auch erste Ideen, vorhandenes Luftbildmaterial für die Nachwelt zu archivieren. Aus heutiger Sicht kann dies reine Sammeln und Aufbewahren als „passives Erstellen von Datenbanken für ein Monitoring“ umschrieben werden. Die Daten hatten verschiedene Maßstäbe, Luftbildqualitäten oder Aufnahmezeitpunkte, die einen systematischen, objektgebundenen Vergleich verschiedener Entwicklungsstadien nicht immer zuließen. Später dann hatte TROLL die Idee, mit Luftbildern „in Zeitabständen wiederholt ... gesammelt ... eine lebende Chronik unserer Wälder“ entstehen zu lassen

(TROLL 1939, S. 27; 1963 S. 159 ff.). Diese ersten Ansätze für ein systematisches Monitoring mit Hilfe der multitemporalen Luftbildauswertung haben auch FELS und EWALD zwischen 1919 und 1922 in verschiedenen Veröffentlichungen dokumentiert und empfohlen: "Früher war es kaum möglich, die Ausdehnung von Überschwemmungen genau festzustellen; das Fliegerbild läßt uns Messungen für jede beliebige Phase anstellen" (FELS 1919, S. 88). „Die Ausnutzung dieses Vorteils durch planmäßige Aufnahmen in zeitlicher Wiederholung läßt uns einen Überblick über die dauernden Wechsellerscheinungen auf der Erdoberfläche gewinnen" (EWALD 1920, S. 40).

Trotz dieser Erkenntnisse mangelte es schon damals an der Umsetzung der Idee in eine multitemporal angelegte Luftbildauswertung für ein Monitoringverfahren. Zum einen ist dies darauf zurückzuführen, daß Bestandserhebungen zunächst im Vordergrund standen. Zum anderen liegt dies aber auch daran, daß die Erstellung multitemporaler Luftbilder damals - wie zum Teil auch heute noch - mangels technischer Ausstattung bzw. Verfügbarkeit dieser Ausstattung zu einem bestimmten Zeitpunkt sowie aufgrund finanzieller Engpässe schwierig (oder damals auch gar nicht) zu bewerkstelligen war. Außerdem verhindern häufig schlechte Wetterbedingungen und Beleuchtungsverhältnisse geplante Luftaufnahmen. Hinzu kam die schlechte Qualität des Filmmaterials (u. a. kaum kontinuierliche Qualität der Filme, für Zwecke der Vergleichsanalyse jedoch unerlässlich). Hier machte die Entwicklung von Filmmaterialien jedoch parallel zu der Entwicklung neuer Methoden für weitere Einsatzzwecke von Luftbildern Fortschritte, die im folgenden stichpunktartig zusammengefaßt werden:

- bis ca. 1935: Es werden nur Schwarzweißfilme für Luftbildaufnahmen genutzt. Nachteilig wirken sich die begrenzten Interpretationsmöglichkeiten durch maximal 20 unterscheidbare Grautonabstufungen, die grobe Körnung des Materials sowie der Luftlichteinfluß und die relativ schlechten Qualitäten von Kameras und Objektiven aus (vgl. auch HELLER 1971, S. 37).
- ab 1935: Die ersten Experimente mit Farbfilmen in Deutschland, die in Ergänzung zu Schwarzweißluftbildern im Kleinformat erstellt und ausgewertet wurden, werden durchgeführt. Danach wird die Analyse von Farbluftbildern operationalisiert (TROLL 1943, S. 128 f.).
- ab ca. 1939: Großformatige Color-Luftbilder werden für forstwirtschaftliche Anwendungen eingesetzt. Nachteile in der Nutzung ergeben sich aus dem schlechten Kontrastverhalten der Filme; Filteranwendungen sind noch keine Routine.
- ab den 40er Jahren: Der amerikanische „Kodak Camouflage Detection Aero Film“ sowie der russische „Spektrozonalfilm SN-2M“ werden als erste Infrarot-Filme für den militärischen Markt entwickelt (vgl. auch HELLER 1971, S. 37 f.; HEIDINGSFELD 1993, S. 3). Der Vorteil dieser Filmtypen besteht in den guten Einsatzmöglichkeiten für landschaftsökologische Fragestellungen, insbesondere Vegetationsschadensanalysen. Parallel dazu erfolgt die Erforschung des Filmmaterials und seiner Eignung für verschiedene, vor allem vegetationspezifische Fragestellungen (vgl. auch HEIDINGSFELD 1993, S. 3 ff.; WOLFF 1970b, S. 39 ff.; HELLER 1971, S. 37 ff.).
- ab den 60er Jahren: Die Freigabe von Infrarotluftbildern für die zivile Nutzung induziert weitere Forschungsaktivitäten zur Nutzung der Bilder (siehe hierzu auch BAUMANN 1957, S. 1 ff.; HILDEBRANDT 1957, S. 285 ff.; MEIENBERG 1966: Identifikationsschlüssel für die Landnutzungskartierung aus Schwarzweiß-, Schwarzweiß-Infrarot- und Farbluftbildern oder HAANTJES 1970: Luftbildgestützte Kartierung von Landschaftseinheiten in Neu Guinea und Papua Guinea). Im

europäischen Raum konzentriert sich die intensive wissenschaftliche Erforschung des Luftbildmaterials für die oben genannten Forschungsfelder vor allem auf die Standorte Freiburg, Eberswalde und Wien (HEIDINGSFELD 1993, S. 5 ff.).

ab ca. 1970: Es werden verstärkt Untersuchungen über den sogenannten „Chlorophyll-Effekt“, also die Zusammenhänge zwischen Infrarot-Reflexion, Pflanzenvitalität, Wassergehalt und physiologischem Zustand der Pflanze durchgeführt (weiterführend hierzu: BENSON & SIMS 1970, S. 446 ff.; HILDEBRANDT & KENNEWEG 1970, S. 446 ff.; KNIPLING 1969, S. 17 ff.). Dies führt zu einer neu entfachten Diskussion über den Informationsgehalt und die Interpretationsverfahren von Infrarotluftbildern in bezug auf die Pflanzenvitalität. Parallel dazu erfolgen großflächige Bestandserhebungen in Nordamerika sowie im nördlichen und östlichen Europa im Bereich Forstwissenschaft und Forstwirtschaft, da in diesen Regionen großflächig Bestände zu inventarisieren und zu untersuchen sind (siehe auch WOLFF 1970a, S. 34 ff.).

ab den 80er Jahren: Die Forschungen konzentrieren sich auf die Erfassung des Phänomens der „neuartigen Waldschäden“ vor allem über Colorinfrarot-Luftbilder (CIR-Luftbilder) (vgl. auch WOLFF 1970a, S. 34 ff.; 1970b, S. 39 ff.; 1991, S. 83 ff.). Forschungsprojekte und Studien diversifizieren sich zu diesem Forschungsschwerpunkt stark, so daß hier stellvertretend für die Fülle der Arbeiten einige genannt werden sollen:

- An der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt wird eine Pilotstudie in Zusammenarbeit mit der Universität Göttingen, später mit der Universität Freiburg, zur Interpretation von CIR-Luftbildern zwecks Waldschadenserkenkung durchgeführt (HARTMANN 1984, S. 131 ff.).
- Ab 1984 erfolgt der Aufbau des Landschaftsinformationssystems LINFOS in Nordrhein-Westfalen. Hier werden konventionell gewonnene Ergebnisse (Feldkartierungen und Luftbildauswertungen) computergestützt archiviert und verwaltet (GENKINGER et al. 1984, S. 32 ff.).
- BIERHALS (1988, S. 77 ff.) legt sehr detailliert die Verfahren und Ergebnisse der Biotoptypenkartierung in Niedersachsen dar und dokumentiert damit den Erfolg von CIR-Luftbild-Analysen.
- Stellvertretend für viele europäische Projekte auf dem Gebiet der CIR-Luftbild-Nutzung für die Waldzustandsanalyse sei das Schweizer Projekt Sanasilva genannt, das Mitte der 80er Jahre begann (SCHERRER et al. 1990).
- Die Praxisreife der Interpretation von Vegetationsschäden wird Ende der 80er Jahre erreicht und durch Abschlußwerke z.B. von der ARBEITSGRUPPE FORSTLICHER LUFTBILDINTERPRETEN (1988, S. 45 ff.) und dem VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE, VDI, dokumentiert (1990).

Zeitversetzt zu der vorgenannten Entwicklung kam Ende der 60er Anfang der 70er Jahre die Multispektralphotographie auf. Sie baut auf dem Prinzip auf, daß mit Hilfe mehrerer Kameras und unter Einsatz verschiedener Spektralfilter Objekte in bestimmten Spektren der elektromagnetischen Strahlung auf schwarzweißen panchromatischen und Infrarot-Filmen abgebildet werden. Über Paßpunkte, Farbzuzuweisung je Bild bzw. je Kanal sowie die Manipulation von Helligkeit und Kontrast je Kanal für die bessere Extraktion von Details können synthetische Farbmischbilder hergestellt werden (vgl. auch KUGLER & JÄNCKEL 1978, S. 99 ff.; COLWELL 1983, S. 281 ff.). Die ersten Experimente mit solchen Kameras wurden raketenschuttle- und flugzeuggestützt durchgeführt (1969: Apollo 9: 4-Hasselblad-Kamera).

Weithin bekannt ist die sowohl flugzeug- als auch raketen-/shuttle-gestützte Nutzung der von der UdSSR und DDR gemeinsam entwickelten Zeiss Jena MKF-6-Kamera (6 Kanäle), die neben anderen Kameratypen in verschiedenen Experimenten im Rahmen des Forschungsprojektes „Interkosmos“ verwendet wurde. In diesen Studien standen häufig landwirtschaftliche Fragestellungen im Vordergrund (vertiefend dazu: BARSCH et al. 1989, S. 48 ff.; BARSCH & WIRTH 1981, S. 149 ff.; BARSCH & WIRTH 1983, S. 191 ff.; KAUTZLEBEN et al. 1990, S. 56 ff.; GIERLOFF-EMDEN 1989, S. 76 ff.).

Da Multispektralaufnahmen in dieser Arbeit keine Anwendung finden, soll diese Thematik hier nicht weiter vertieft werden. Weiterführende Informationen sind dem Werk von WENDEROTH et al. (1974), dem von COLWELL (1983) herausgegebenen Werk „Manual of Remote Sensing in two Volumes“ sowie verschiedenen Veröffentlichungen der Deutschen Akademie der Landwirtschaftswissenschaften/DDR vornehmlich aus den 70er Jahren zu entnehmen.

Jedoch entwickelte die Fernerkundung - wiederum zeitversetzt zu den zuvor beschriebenen Prozessen - einen weiteren Zweig, dessen Einsatzmöglichkeiten für landschaftsökologische Fragestellungen schnell entdeckt und erforscht wurden: die satellitengestützte Fernerkundung. Sie wurde durch Forschungen während des II. Weltkrieges induziert.

Nach ersten Tests mit der deutschen weiterentwickelten Kriegsrakete V2, die 1946 gestartet wurde, um erste Photos auch aus größeren Höhen (120 km) von der Erdoberfläche zu gewinnen, konnten in den 60er Jahren erste Wettersatelliten der USA (TIROS 1) und der UdSSR (Molinija 1) ihren Routinebetrieb aufnehmen (STAMS 1972, S. 258 ff.). Heute steht weltweit eine große Bandbreite an Satellitenbilddaten zur Verfügung; die Anwendungsfelder sind dabei sehr vielfältig (vgl. Tab. A.1 bis A.10 im Anhang A, die ohne Anspruch auf Vollständigkeit einen ersten Überblick aktueller und zukünftig geplanter Sensoren geben).

Neben einer Vielzahl von bisher rein experimentell genutzten Sensoren haben sich einige für den operationellen Einsatz im Rahmen landschaftsökologischer Fragestellungen etabliert. Hierzu gehören vor allem die Sensoren NOAA-AVHRR, Landsat MSS und Landsat TM sowie SPOT XS und SPOT PAN (die Nutzung von IRS-1C- und IRS-1-D-Daten zeigt erste vielversprechende Ergebnisse; Radarsensoren bleiben an dieser Stelle unberücksichtigt, weiterführende Informationen dazu unter:

- [www.euromap.de/doc\\_106.htm](http://www.euromap.de/doc_106.htm),
- [www.euromap.de/doc\\_005.htm](http://www.euromap.de/doc_005.htm),
- [www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/homepg?e](http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/homepg?e),
- [//southport.jpl.nasa.gov/polar/ers1.html](http://southport.jpl.nasa.gov/polar/ers1.html),
- [//198.103.176.126/adrohomepage.html](http://198.103.176.126/adrohomepage.html); vgl. hierzu auch GIERLOFF-EMDEN 1989, S. 100 ff.; KRAMER 1994, S. 7 ff.; JÜRGENS 1998, S. 119 ff.).

Wichtige Vorteile der genannten Sensoren liegen in dem günstigen spektralen Auflösungsvermögen und in der Kontinuität der Datenqualität, die bis über 20 Jahre zurückreicht. Dadurch, daß diese Daten - ohne größere Ausfälle - über einen solchen Zeitraum in vergleichbarer Qualität vorliegen (Wahl der Spektralkanäle, Bahnparameter, geometrische Auflösung

etc.) steht eine Datenbank von großem Wert für landschaftsökologisch orientierte Monitoringprogramme zur Verfügung.

Gerade die Daten des NOAA-AVHRR besitzen den Vorteil einer guten Repititionsrate (24 Stunden für eine gesamte Erdbedeckung, 11 Tage für identische Erdausschnitte, vgl. Tab. A.2 im Anhang A), die die Abhängigkeiten von Wettereinflüssen wie z.B. Bewölkung aufgrund der dichten Repititionsrate reduziert. Hinzu kommen die für NOAA-AVHRR-Daten relativ günstigen Preise (CRACKNELL 1997, S. 4 ff.; Internet-Recherche: [www.goin.nasda.go.jp](http://www.goin.nasda.go.jp)). Daten des Sensors kommen über die geplanten Anwendungsgebiete im Rahmen meteorologischer Fragestellungen (Meeres- und Landoberflächentemperatur, Schnee- und Eis-Monitoring, klimatologische Messungen etc.) hinaus auch für mittlerweile kontinuierlich durchgeführte Vegetationsmonitoringprogramme auf globaler bis nationaler Ebene zur Anwendung (geometrische Auflösung von 1,1 km Pixelkantenlänge). Neben Aufgaben im Bereich der Früherkennung von Dürregefahr- und Brandgefahrzonen, in den Bereichen Pflanzenvitalität, Pflanzen- und Bodenfeuchte sowie der Ermittlung von Verdunstungsraten stehen Fragen zur jahreszeitlich schwankenden Entwicklung und Ausprägung der Phänologie im Vordergrund (CRACKNELL 1997, S. 233 ff.).

Die SPOT-Daten bestechen hingegen vor allem durch ihre vergleichsweise gute geometrische Auflösung (10 m bzw. 20 m Pixelkantenlänge). Sie werden häufig im Rahmen einer Datentransformation zur Verbesserung der geometrischen Auflösung radiometrisch gut auflösender Satellitenbilddaten wie z.B. Landsat TM verwendet. Landsat MSS und vor allem Landsat TM weisen gegenüber NOAA-AVHRR eine höhere geometrische Auflösung sowie enger gefaßte Spektralkanäle (TM: 7 Kanäle) auf, was Vorteile bei der Detektion birgt (Spektralsignatur, Objektidentifikation). Die Daten liefern differenziertere Informationen für geologische Untersuchungen, Analysen zu Pflanzenvitalität und -feuchte, Bodenbedeckungsgrad und -feuchte, zu Bodenversiegelungsgraden oder Gewässerqualitäten (Repititionsrate 18-16 Tage, 8 Tage ab 60° n.Br.: s. Tab. A.1 Anhang A).

Sollte nun der Eindruck entstanden sein, daß Fernerkundungsdaten weltweit Lösungen für (fast) alle Fragen und Probleme im Umweltbereich bereithalten, so ist diese Euphorie trügerisch, denn Vertrieb und Nutzung von Fernerkundungsdaten - gerade auch von Satellitenbilddaten - sind nach wie vor problembehaftet. Für die Mängel beim Transfer dieser Daten in den Anwendungsbereich hinein sind mehrere Begründungszusammenhänge verantwortlich (vgl. auch EHLERS 1995, S. 36 ff.; KLEUTER 1997):

#### 1. Mangelnde Kommunikation zwischen Anbietern und Nutzern:

Ein schwerwiegender Punkt ist die unzureichende Kommunikation zwischen Herstellern von Fernerkundungssystemen und Nutzern. Hierdurch wird eine Konfiguration und Kalibrierung oder gar Entwicklung von Systemen, die anwendungsspezifischen Fragestellungen optimal dienen können, behindert. Um diesen Mangel zu beheben, wurde der kommerzielle (und nicht vordringlich staatlich und militärisch) hochauflösende Sensor IKONOS entwickelt, der nutzerorientiert gebaut wurde (bis 1 m Bodenauflösung, günstige spektrale Auflösung für Planungs- und Umweltschutzaufgaben: vgl. Tab. A.5 Anhang A).

Seit September 1999 stellt er Daten für Planungs- und Umweltschutzaufgaben zur Verfügung. Die Herstellung eines solchen Konkurrenzproduktes statt der Nutzung vorhandener Ressourcen liegt zum Großteil in der nach wie vor stark kontrollierten Datendistributions- und Preispolitik von bisher auch militärisch genutzten Daten begründet. Die Marktöffnung und entsprechende Preisanpassungen gehen zum Teil nur schleppend voran.

Hinzu kommt, daß das ständig sinkende Preisniveau von Fernerkundungsdaten, insbesondere von Satellitenbilddaten (Landsat TM-Miniszene: 200 DM, Radarszene: 100 US\$: <http://isis.dlr.de>, SCALES/DLR 1999: mündliche Mitteilung) sowie das flexibler gewordene Angebot von Daten (Szenengröße, radiometrische Auflösung) dem potentiellen Nutzer kaum bekannt ist. Folglich wirken Standardpreise für Standardprodukte wie eine Landsat TM-Vollszene von 3500,- Euro nach wie vor abschreckend (Internet-Recherche: [www.eurimage.com](http://www.eurimage.com)). Hinzu kommt, daß viele Nutzer Fernerkundungsdaten und speziell Satellitenbilddaten als überteuert einschätzen, da das Verhältnis von Kosten zu Nutzen sehr ungünstig erscheint. Dies liegt darin begründet, daß die Anwender den Informationsgehalt von Fernerkundungsdaten in der Regel nur zu einem sehr geringen Teil nutzen. Folglich entsteht der verzerrte Eindruck überteuerter Daten. Eine stärker auf den Kunden orientierte Informationspolitik, die auch Detailinformationen zur Verfügung stellt, könnte hier Abhilfe schaffen. Ein flexiblerer Umgang mit den Daten z.B. im Rahmen von Kooperationsverträgen oder „joint ventures“ wäre für den Einsatz von Fernerkundungsdaten ebenfalls förderlich (EHLERS 1995, S. 36 ff.).

## 2. Akzeptanzprobleme bei Nutzern:

Für die optimale Nutzung (Stichwort: „data exploitation“) der Fernerkundungsdaten sind computergestützte Programme nicht mehr wegzudenken (z.B. GRASS, IDRISI als GIS-Software mit beachtlichen Modulen zur Analyse von Fernerkundungsdaten, EASI PACE, ERDAS Imagine). Da die Preise für Hard- und Softwareprodukte stetig sinken, ist eine solche Anschaffung für größere Institutionen wie auch kleinere Büros heute kein großes finanzielles Problem mehr. Viele Einrichtungen verfügen oftmals schon über gute und ausbaufähige Kapazitäten im Hard- und Softwarebereich (hier als GIS meist ArcInfo bzw. ArcView), so daß die Anschaffung einer Fernerkundungssoftware möglich wird (je nach System und Lizenzanzahl ca. 500,- bis 20.000,- DM; vgl. Kap. 7).

Leider werden Anschaffung und Nutzung von Hard- und Software häufig durch Berührungsängste und mangelnde Flexibilität auf seiten der potentiellen Nutzer be- oder sogar verhindert. Vielfach werden moderne Verfahren und Methoden wie die rechnergestützte Auswertung von Fernerkundungsdaten pauschal abgelehnt; häufig aus einer unbestimmten Angst vor Konkurrenz und Arbeitsplatzverlust. Diese unzureichende Flexibilität und Einsicht ist gerade bei öffentlichen Institutionen sehr oft gepaart mit lähmender Bürokratie und Trägheit, die eine Implementierung moderner Techniken und Verfahren zur Optimierung von Aufwand und Qualität der Arbeit (auch des Arbeitsprozesses) verhindern (dies bestätigen

u.a. DAVIS et al. 1991, S. 689 ff.; CZERANKA & EHLERS 1996, S. 12). Eine Alternative bietet hier das „Outsourcing“.

Nicht zuletzt darf das gemeinhin verbreitete Image der sogenannten „Forschungsfront“, die häufig mit Schlagworten wie „höher, schneller, weiter“, „realitäts- und praxisfern“, „exotisch“ charakterisiert wird, in seiner Wirkung nicht unterschätzt werden (DODT 1999: mündliche Mitteilung). Der potentielle Nutzer fühlt sich folglich oft durch ein Angebot zur Nutzung von Fernerkundungsdaten für seine Fragestellungen überfordert, empfindet die Nutzung als unangemessen, übertrieben, da sie dem Vergleich mit innovativen Forschungen nicht standhält. Anschaffungen ähnlicher Art, wie sie für Wissenschaft und Forschung getätigt werden, werden daher häufig pauschal abgelehnt.

### 3. Politik, Wirtschaft und der Einsatz von Fernerkundungsdaten - Probleme beim Informationsaustausch:

Auffällig ist, daß die Fernerkundungsfachwelt oftmals von Politik und Wirtschaft isoliert bleibt. Dies ist bedauerlich, da gerade für die Politik Informationsgrundlagen zur Erforschung von Schadensursachen und ökosystemaren Ursachen-Wirkungs-Beziehungen enorm wichtig sind. Sie können wesentlich der Festlegung umweltpolitischer Ziele dienen (vgl. auch EHLERS 1995, S. 43).

Die Bedeutung der Fernerkundung für den Umweltschutz und speziell für das Umweltmonitoring wird in Deutschland nur vereinzelt von politischen Entscheidungsträgern auf verschiedenen Ebenen gesehen und kommt in einigen wenigen übergreifenden Veröffentlichungen auf Bundesebene zum Ausdruck. Dem stehen viele Projektberichte spezieller Projektgruppen gegenüber. Genannt werden sollen an dieser Stelle stellvertretend die Studie „Auswertung von Satellitenaufnahmen zur Gewinnung von Flächennutzungsdaten“, die 1979 im Auftrag des BUNDESMINISTERS FÜR RAUMORDNUNG, BAUWESEN UND STÄDTEBAU veröffentlicht wurde. 1994 wurde vom BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTOR-SICHERHEIT (BMU) und vom BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (BMBF) die Arbeit „Satellitenfernerkundung für Umweltpolitik und -forschung; Bestandsaufnahmen - Analyse - Perspektiven“ herausgegeben, die insgesamt einen allgemeinen Übersichtscharakter hat und in Absichtserklärungen bezüglich des vermehrten Einsatzes von Satellitenbilddaten verharret.

1997 wurde im Auftrag des UMWELTBUNDESAMTES eine Studie über die „Konzeption für eine ökosystemare Umweltbeobachtung“ veröffentlicht. In ihr wird im wesentlichen die Forderung des SRU nach einem sektorübergreifenden integrierenden Umweltmonitoring weitergeführt, wobei der Einsatz von Fernerkundungsdaten jedoch nur eine untergeordnete Rolle spielt. Ähnlich verhält es sich mit einer weiteren Veröffentlichung des UMWELTBUNDESAMTES (1999). Hier kann man im Bereich B: „Naturschutz und Ökologie“ Hinweise auf Forschungsvorhaben im Monitoringbereich finden, jedoch ohne explizite Nennung des Einsatzes von Fernerkundungsdaten.

Eine gute Übersicht zum aktuellen Stand der Nutzung von Satellitenbilddaten bietet die vom BMBF zusammen mit der DEUTSCHEN GESELLSCHAFT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (DGLR) (1999) herausgebrachte Broschüre „Erданwendungen der Weltraumtechnik - Geo-Informationen vom Satelliten zum Verbraucher“.

Allerdings führt die Anwendung von Fernerkundungsdaten noch häufig ein Schattendasein. Im Kontrast dazu stehen die vielen erfolgreichen Forschungsvorhaben sowie die Nutzung und operationelle Anwendung dieser fernerkundlichen Verfahren in Forschungseinrichtungen und deren Umfeld. So werden für Deutschland meist auf Landesebene oder unter Beteiligung verschiedener Einrichtungen mit Unterstützung einer Landesregierung diverse fernerkundungsgestützte Monitoringprogramme durchgeführt. Häufig sind dies Pilotprojekte, die weitere Forschungen induzieren (weitere Beispiele hierzu bei WEIERS 1999, S. 83 ff.; ZIEMKE & GÜLS 1999, S. 91 ff.; WERNER & KENNEWEG 1999, S. 79 ff.; MEINEL et al. 1997, S. 8 ff.).

Auf europäischer Ebene ist das Projekt CORINE zu nennen. CORINE lief EU-gestützt im Zeitraum von 1985 bis 1990 und hatte zum Ziel, europaweit eine Standardisierung und Harmonisierung bei Aufbau, Verwaltung und Austausch von Umweltdatenbanken herbeizuführen. Dies wurde an Projekten zu Landnutzung, Ressourcenforschung, Bodenerosion, Wasserressourcen, Biotopkartierungen etc. durchgeführt. Die Daten wurden in der Regel für kleine Maßstäbe (1:100.000 und kleiner) zusammengetragen, wobei die rechnergestützte Datenverwaltung und die Auswertung von Fernerkundungsdaten zentrale Bestandteile waren. Im Rahmen der Landnutzungsklassifizierung wurden 44 Nutzungskategorien in drei Ebenen unterschieden bei einer unteren Erfassungsgrenze von 25 ha. Fernerkundliche Datengrundlagen für die Analysen waren Landsat TM-Daten, SPOT-Aufnahmen und Luftbilder; hinzu kamen weitere Quellen wie topographische und thematische Karten (siehe auch KALENSKY 1996, S. 421 ff.; VOLK & STEINHARDT 1998, S. 350 ff.; MEINEL et al. 1997, S. 8 f.; SCHÖNTHALER et al. 1997, S. 7 ff.).

Daneben existieren eine Vielzahl an international durchgeführten Projekten zu Umweltmonitoringverfahren wie zum Beispiel AFRICOVER (Landcover Database and Map of Africa), Global Map, MARS (Monitoring Agriculture with Remote Sensing), FRA-90 (Forest Resources Assessment), GTOS (Global Terrestrial Observing System), PMK (Multimediales, integriertes Programm zum Umweltmonitoring in Schweden) und nicht zuletzt das in internationalen Fachkreisen beachtete, im Nationalpark Berchtesgaden durchgeführte MAB-6-Projekt (KALENSKY 1996, S. 421 ff.; SCHÖNTHALER et al. 1997, S. 7 ff.). Auch im Zuge der Lokalen Agenda 21 hat die Fernerkundung Dokumentations- und Beweissicherungsaufgaben: „Agenda 21 - An Action Plan for the 21<sup>st</sup> Century“, Kapitel 40 „Information for Decision Making“ (vgl. EHLERS 1997, S. 8).

Nach dieser Übersicht über die Geschichte und die Entwicklungen zum Einsatz von Fernerkundungsdaten für Fragen des Umweltmonitorings erscheint eine vergleichende Zusammenfassung der Entwicklungen sinnvoll. Dadurch werden Stärken und Schwächen einzelner technologischer Fortschritte klarer. Zudem lassen sich Forschungslücken aufdecken.

Im Detail werden folgende vier Entwicklungsstränge zum besseren Verständnis getrennt aufgezeigt, obwohl sie natürlich eng miteinander verzahnt sind:

1. Entwicklung von analogen (Photo) hin zu digitalen Datenaufnahmen (Scanergebnis: multi- bis hyperspektral). Die radiometrisch besser auflösenden Scannerdaten lassen detailliertere spektrale Analysen zu. Allerdings ist die hervorragende geometrische Auflösung der analogen Luftbilder durch Scannerdaten nach wie vor unerreicht. Für viele Anwendungen genügen jedoch radiometrisch hochauflösende Scannerdaten mit einer Bodenauflösung bis zu 1 m Pixelkantenlänge.
2. Entwicklung von flugzeuggestützter hin zur satellitengestützten (shuttlegestützten) Datengenerierung. Dies bietet im Zusammenhang mit der Entwicklung neuer Technologien die Möglichkeit, weitere Untersuchungen (z.B. Atmosphärenanalysen) komplementär zu bestehenden Untersuchungen der Erdoberfläche durchzuführen. Außerdem lassen Satellitenbilder großflächige, zusammenhängende Betrachtungen zu Verbreitungen von Phänomenen (z.B. Waldbrände) auf nationaler oder internationaler Ebene zu. Dadurch werden Gesamtzusammenhänge aufgedeckt. Flugzeuggestützte Daten würden aufgrund ihrer Detailschärfe und somit ihres Datenumfangs für Analysen dieser Art eher hinderlich als dienlich sein.
3. Entwicklung weg von lang andauernden, unregelmäßigen Repititionsraten hin zu kürzeren und regelmäßigen Repititionsraten. Gerade die flugzeuggestützte Datenerhebung unterliegt häufig langen Repititionsraten (i.d.R. mindestens ein Jahr, häufig bis zu 10 Jahren und mehr) aufgrund von Aufwand, Kosten und Organisationsproblemen sowie Wettereinflüssen (s.o.). Dies führt oftmals dazu, daß sich das angesetzte Zeitraster für einen multitemporalen Luftbilddatensatz im Rahmen eines Monitoringverfahrens verschiebt und damit die Vergleichbarkeit der einzelnen Zeitschnitte gefährdet wird (Stichwort Phänologie). Satellitengestützte Sensoren hingegen verfügen über sehr stabile Repititionsraten (inklusive Sonnensynchronität bei polaren Orbits). Diese waren anfänglich - und sind für einige Systeme auch heute noch - recht lang (IRS-1C: 24 Tage), jedoch ist dies durch die fortschreitende Verdichtung der Satellitennetze vielfach auf wenige Tage reduziert worden (z.B. Verdichtungen für NOAA-AVHRR, Landsat TM 4, 5, 7; Landsat-Serie: 4 Tage). Dadurch werden fernerkundungsgestützte Monitoringprogramme in der Festsetzung ihrer internen Wiederholungsrate flexibler. Außerdem reduziert sich die Abhängigkeit von Wettereinflüssen wie z.B. Bewölkung, da die Anzahl und folglich die Auswahl der Aufnahmen steigt (s. Tab. A.1 Anhang A).
4. Im Zuge des rasanten Fortschritts bei Analog-Digital-Scannern kommt es schließlich zu einer Entwicklung hin zum Scannen zuvor analog aufgenommener Luftbilder. Die Technologien liefern mittlerweile hochwertige Scanergebnisse, so daß die erstellten digitalen Datensätze kaum Qualitätsverluste in der Geometrie und der Radiometrie aufweisen. Folglich bleiben die exzellente geometrische Auflösung wie auch die wertvollen Tonwertabstufungen eines analogen Luftbildes erhalten (bei derzeit üblichen Scanauflösungen von 300-4000 dpi bzw. 7  $\mu\text{m}$ ); durch parallel laufende Fortschritte im Hard- und Softwarebereich zur Verarbeitung solcher Datenmengen wird das Datenhandling immer komfortabler und übersichtlicher.

Trotz dieser hervorragenden Voraussetzungen werden Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme und speziell für landschaftsökologisch ausgerichtete Programme kaum kontinuierlich eingesetzt. Der Forschungsbedarf für dieses Themenfeld ergibt sich aus folgenden Defiziten:

- Zum Teil sehr spezialisierte Anwendungen von Fernerkundungsdaten - häufig im Rahmen von Pilotprojekten - z.B. für die Verkehrsplanung, den Mobilfunk, das „Precision Farming“ oder für das Monitoring von Werksgebieten oder Pipelines (DUTTA 1999; SCHWAIBERGER 1999; ROHBECK 1999).
- Verwendung von Fernerkundungsdaten für 3D-Visualisierungen und -Simulationen, ohne den Informationsgehalt der Daten zu nutzen (vgl. hierzu auch PIRCHL et al. 1997, S. 21 ff.; BLASCHKE 1999; HEHL-LANGE & LANGE 1999, S. 301 ff.).

Dieser Trend der sehr rudimentären Nutzung (versus „data exploitation“) und der sehr speziellen Anwendungen, die oft nur wenige Teilaspekte und Vorteile von Fernerkundungsdaten ausschöpfen und keine reproduzierbaren Routinen für den Praxisalltag entwickeln, setzt sich auch bei fernerkundungsbasierten Umweltmonitoringverfahren fort.

Vorhandene Informationspotentiale, auch in Kombination mit auftretenden Synergieeffekten bei umfassender Nutzung der Daten, werden nicht freigesetzt:

- Auch hier bleibt die Nutzung der Fernerkundungsdaten oft weit hinter den Möglichkeiten zurück, da sie nur der Visualisierung oder als Kartengrundlage dienen.
- Hinzu kommt, daß fernerkundungsgestützte Umweltmonitoringverfahren häufig keinen Praxisbezug haben (z.B. Entwicklung praxisrelevanter Routinen), da es sich um EU-, bundes- oder landesgestützte Pilotstudien handelt. Zwar wird in diesen Studien der Informationsgehalt der Daten in der Regel in akzeptablem Umfang ausgeschöpft, jedoch werden hierfür häufig spezielle Programmentwicklungen eingesetzt. Da diese Programme aufgrund ihrer Spezifikationen im allgemeinen nicht weiterverwendet oder gar kommerziell vertrieben werden können, sind diese Ansätze unrealistisch. Auch die Arbeitsbedingungen entsprechen häufig nicht der Realität: Probleme mit der Datenbeschaffung, Kapazitäten im Hard- und Softwarebereich, mit dem Personal, dem Zeitaufwand und Terminen, der Methodenreinheit und -reproduzierbarkeit sowie mit der Praktikabilität etc. treten kaum auf. Ein Nachvollzug der so entwickelten Verfahren und Methoden im Praxisalltag gestaltet sich folglich schwierig.

Die oben skizzierten Defizite erfordern Lösungen. Diese werden in der vorliegenden Studie erarbeitet.

#### Exkurs: Der Begriff „change detection“ in der Fernerkundung

Der Begriff „change detection“ wird in der Fernerkundung in verschiedenen Zusammenhängen verwendet und zum Teil auch sinnverwandt mit „Umwelt“- bzw. „Vegetationsmonitoring“ benutzt: „study of change detection“ (MATHER 1999, S. 91). Allgemein läßt sich der Begriff „change detection“ aus dem Englischen ins Deutsche mit der Umschreibung

„Nachweis oder Feststellung von Veränderung bzw. Wandel“ übersetzen. GIERLOFF-EMDEN (1989) beschrieb den Begriff als „Das Aufnehmen zeitvariabler Erscheinungen“ (S. 387) bzw. „sich wandelnde Erscheinungen, wie z.B. die Vegetationsentwicklung..., deren Aufnahme als change detection bezeichnet wird“ (S. 3).

Häufig wird der Begriff „change detection“ in der Fernerkundung im Zusammenhang mit der Verarbeitung und Auswertung von Datensätzen benutzt: „change detection methods“, „change detection techniques“, „change detection analysis“ oder „change detection algorithms“ (vgl. hierzu auch COLWELL 1983, S. 1612 ff.; WILLIAMS 1995, S. 124 f.; JENSEN 1996, S. 257 ff.; LYON et al. 1998, S. 143).

Die modellhaften Erklärungsansätze hierzu werden im allgemeinen wie folgt hergeleitet:

- Ein Untersuchungsraum wird zwecks Feststellung möglicher Veränderungen z.B. der Landbedeckung über Fernerkundungsdaten, die zu mindestens zwei verschiedenen Zeitpunkten aufgezeichnet worden sind, analysiert.
- Dazu müssen die Datensätze mindestens georeferenziert, besser aber geocodiert sein, so daß punkt- oder flächenhafte Phänomene korrekt verortet bzw. identifiziert werden können. Dies ermöglicht nachvollziehbare, in bezug auf die Geocodierung weitgehend fehlerfreie vergleichende Untersuchungen (vgl. auch LAMBIN 1996, S. 931 f.; COLWELL 1983, S. 1612 ff.).

Über verschiedene arithmetische Rechenoperationen bzw. Bildtransformationen, die für beide Datensätze oder mit beiden Datensätzen erfolgen, wie

- Subtraktion,
- einfache Division,
- (Multi-)Ratio-Bildung,
- Hauptkomponententransformation,
- Tasseled-Cap-Analyse jeweils ausgewählter Kanäle/Kanalkombinationen

werden Spektral-Informationen extrahiert (vgl. u.a. auch GONG 1993, S. 22 f.; MATHER 1999, S. 114 ff.). Diese Informationen stehen dann „studies of change detection“, Umweltmonitoringverfahren oder ähnlich gelagerten Untersuchungen für Vergleichsanalysen zur Verfügung. „Change detection“ in diesem Sinne meint also, daß Bildoperationen zur Extraktion von Spektralinformationen aus Fernerkundungsdatensätzen benutzt werden. Der Begriff wird auch in dieser Arbeit in diesem Sinne verstanden und ist im eingangs genannten Organigramm dem Punkt vier: Analysemethoden der Fernerkundung zuzuordnen (vgl. Abb. 1.4).

## 1.4 Ziele der Arbeit

Das Hauptziel der vorliegenden Arbeit ist die Entwicklung praxisfähiger Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Fernerkundungsdaten zur Bearbeitung von Fragen des Umweltmonitorings. Schwächen sowie Anwendungs- und Vollzugsdefizite von Umweltmonitoringverfahren sind in der Literatur vielfach belegt. Dies im Rahmen dieser Arbeit auszuführen würde den Rahmen sprengen; daher sei hier auf Literatur verwiesen: SRU 1991, S. 7; vgl. auch SCHÖNTHALER & KÖPPEL 1999, S. 23 ff.; PEITHMANN 1996, S. 191 f.; DRAGGAN et al. 1987, S. XVII; MAAS & PFADENHAUER 1994, S. 44; DRIVER & CHAPMANN 1996; HUGGETT 1997; HAUSHERR & JUNGMEIER 1999, S. 39 ff.; BENNET & CHORLEY 1978, S. ;259-262; SPELLERBERG 1991, S. 80.

Abbildung 1.5 zeigt, daß die Verwirklichung des angestrebten Zieles mit Beendigung der Studie erreicht sein wird.

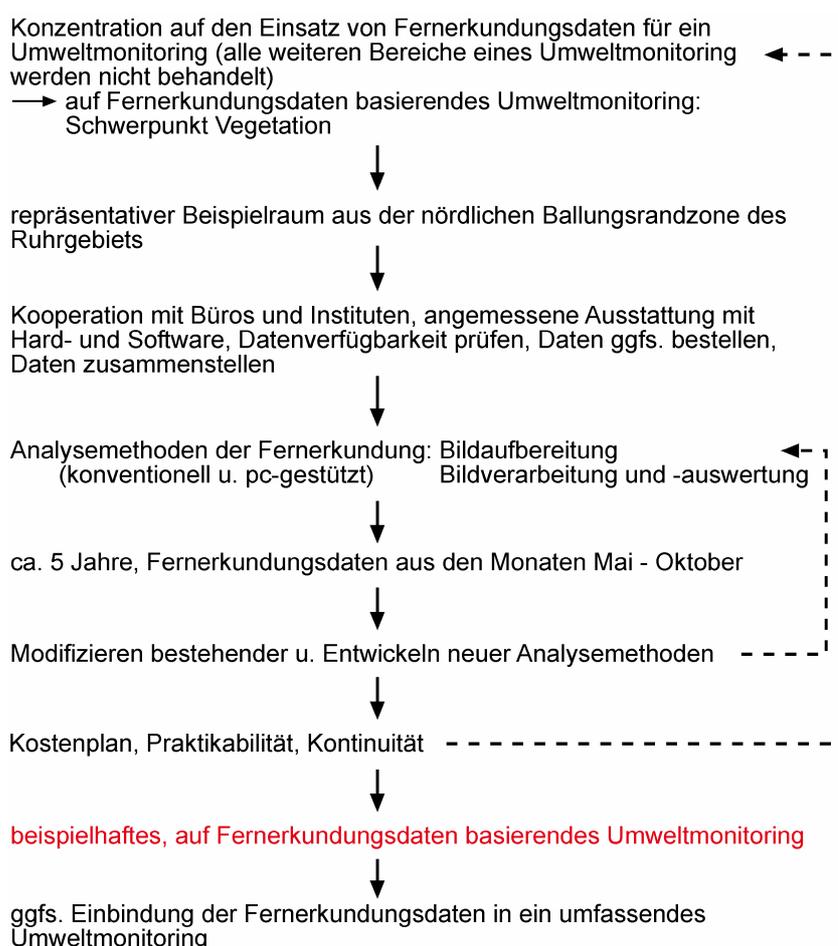


Abb. 1.5: Beispielhaftes Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme

Dabei konzentriert sich die Arbeit im wesentlichen auf folgende Themenbereiche:

- a) Nutzung („data exploitation“) bewährter Fernerkundungsdaten,
- b) Nutzung der Synergieeffekte, die durch den Einsatz multisensoraler, multitemporaler und multiskalarer Fernerkundungsdaten auftreten,
- c) praxisorientierte Rahmenbedingungen der Arbeit.

Zu a):

Für die vorliegende Studie wurden mit Landsat TM-, Landsat MSS-, SPOT PAN-, CIR-Luftbild- und Colorluftbilddaten bewährte und marktgängige Fernerkundungsdaten eingesetzt. Dies hat zwei Vorteile:

1. Die Daten weisen eine langjährige stabile Kontinuität in bezug auf die Datenverfügbarkeit und die Datenqualität auf und eignen sich daher für ein Monitoring. Diese Datentypen werden bereits routinemäßig in verschiedenen Themenzusammenhängen eingesetzt. Das heißt, daß z.B. eine pc-gestützte Datenanalyse - vor allem der Satellitenbilddaten - gesichert ist, da Erfahrungen im Datenhandling bei auftretenden normalen Qualitätsschwankungen (Stripping, Atmosphärenkorrektur etc.) wie auch mit der Beschaffung der Daten (Anbieter, Preise, Lieferzeiten) vorliegen und weitestgehend standardisierte Lösungsmöglichkeiten bestehen. Anders als bei der experimentellen Nutzung neuer Fernerkundungsdaten kann man hierbei als Nutzer auf einen weitverbreiteten Wissenspool, z.B. via Internet, zurückgreifen. Für den Praxisalltag in Kommunen oder Gutachterbüros ist dies ein entscheidender zeit- und kostensparender Aspekt. Im Gegensatz dazu stehen Pilot- und Forschungsprojekte von Institutionen wie der DLR, NASA etc., die, losgelöst von Restriktionen des Praxisalltags, neue, allgemein nicht oder nur schwer zugängliche Fernerkundungsdaten mit experimentellem Charakter ohne ausreichende empirische Basis erforschen. Die operationelle, routinemäßige Nutzung dieser Daten sollte sich daran idealerweise anschließen.
2. Im Zusammenhang mit dem zuvor genannten Aspekt steht der zweite Vorteil: Die Studie zielt darauf ab, bewährte Fernerkundungsdaten möglichst umfassend auszunutzen, um ein größtmögliches Maß an Informationsextraktion zu erlangen. Statt neuere Konkurrenzprodukte ohne langjährige, vergleichbare Datenaufzeichnungen zu erforschen - was im übrigen zunächst keine Praxisrelevanz für Kommunen oder Gutachterbüros besitzt (s.o.) - werden einige der noch unerforschten Möglichkeiten bestehender Fernerkundungsdaten analysiert (an dieser Stelle sei an den vernachlässigten Kanal Landsat TM 6 erinnert). Diese Arbeit ist folglich nicht eine weitere experimentelle Analyse neben anderen experimentellen Untersuchungen einer sogenannten „Studienwelle“ im Zuge eines neu implementierten Sensors. Vielmehr sollen bewährte Fernerkundungsdaten ergebnisorientiert kombiniert werden, so daß die daraus resultierende Leistungsfähigkeit von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringverfahren geprüft und ausgereizt wird. Das heißt, daß durch Verknüpfen bewährter Methoden ein neuer Methoden-„Mix“ mit emergenten Eigenschaften entsteht. Emergenz bedeutet in diesem Zusammenhang, daß aus Methoden, die auch unabhängig voneinander angewandt werden können, ein

Methoden-„Mix“ zusammengeschmolzen wird, der neue Eigenschaften und Möglichkeiten birgt. Die Charakteristika der einzelnen Verfahren stehen nicht mehr nebeneinander, sondern sind neu miteinander kombiniert. Die Arbeit konzentriert sich dabei darauf, daß die Emergenz gefördert wird und nicht ein Anhäufen neuer Methoden ohne empirisch fundierte Hintergründe und oftmals ohne Zukunftsperspektiven betrieben wird.

Zu b):

Die kombinierte Nutzung von Fernerkundungsdaten verschiedener Qualitäten wird vielfach propagiert, jedoch selten umgesetzt. Für diese Studie soll dies allerdings durchgeführt werden. Bekannt sind Bildtransformationen mit Satellitenbilddaten unterschiedlicher geometrischer Auflösungen wie z.B. mit Landsat TM und SPOT PAN (weiterführend hierzu: CSAPLOVICS 1992, S. 441 ff.; CHICA-OLMO & ABARCA-HERNÁNDEZ 1998, S. 997 ff.; POHL & VAN GENDEREN 1998, S. 823 ff.; ZHOU et al. 1998, S. 743).

Untersucht wird für diese Arbeit die kombinierte Auswertung unterschiedlicher Sensordaten im Rahmen einer Zeitreihenanalyse. So werden CIR- und Colorluftbilddaten vergleichend analysiert; das gleiche gilt für die Landsat TM-, Landsat MSS- sowie die SPOT PAN-Daten. Außerdem wird exemplarisch getestet, ob und inwieweit die verschiedenen Bodenaufösungen und Maßstabsebenen von Luft- und Satellitenbilddaten kombiniert untersucht werden können. Die Satellitenbilddaten sind dabei spektral höher auflösend und decken zudem ein breiteres elektromagnetisches Spektrum als die Luftbilddaten ab. Diese hingegen weisen eine deutlich höhere geometrische Auflösung auf.

Für die Studie gilt, die Vorteile aus der kombinierten Nutzung multisensoraler, multiskalarer und multitemporaler Fernerkundungsdaten herauszuarbeiten, die Synergieeffekte zu benennen und ergebnisorientiert zu nutzen (s.o. Stichwort Emergenz).

Zu c):

Die Ausstattung mit Hard- und Software-Komponenten erfolgt über die Universität. Dies führt zwar für einige Software-Komponenten und Wartungsverträge zu finanziellen Vorteilen, diese werden jedoch durch die universitätsgebundene Anschaffung von Hardware, die zum Großteil im oberen Preisdrittel der marktüblichen Preise liegt, wieder ausgeglichen. Darüber hinaus werden vor allem im Bereich der Hardware über Kooperationen mit anderen Institutionen weitere Komponenten wie z.B. Scanner oder Plotter und Drucker mit genutzt.

Ähnliches gilt für die Bereitstellung und Beschaffung von Informationsquellen. Die Leihgaben sind aufgrund der wissenschaftlichen Anwendung der Daten in der Regel kostenlos erfolgt. Jedoch besteht auch für Büros oder Kommunen die Möglichkeit, Daten z.B. gegen geringe Leihgebühren zu nutzen oder im Austausch unentgeltlich zu verwenden. Diese Variante der

Datennutzung dürfte attraktiver sein, als für die Daten im Zuge einer Neu- bzw. Erstanschaffung den Originalpreis zu entrichten.

Im Zuge der Arbeit sind sukzessive Kontakte zu Institutionen und Büros aufgebaut und verfestigt worden, die ebenfalls im Untersuchungsraum im Rahmen von Umweltschutzaufgaben tätig sind (vgl. Kap. 2.2). Zum Teil herrscht ein reger Austausch von Informationen unterschiedlichster Qualität.

Ein weiterer, sehr realitätsnaher Aspekt ist die Verfügbarkeit von Daten in geeigneten Zeitschnitten. Für ein Umweltmonitoring sind ideale Wiederholungsraten für Untersuchungen vielfach diskutiert worden (s. Kap. 1.2.), in der Realität sind diese Raten aufgrund von Imponderabilien häufig nicht einzuhalten. Dies gilt auch für die hier benutzten Fernerkundungsdaten. Die Luftbilddatensätze sind aufgrund ihrer Aufnahmedaten in Kombination mit den Satellitenbilddaten nur eingeschränkt nutzbar. Hier müssen Kompromisse in bezug auf die Qualität der Fernerkundungsdaten (Stichworte Phänologie, spektrale Auflösung), auf die Repetitionsraten der Untersuchungen und auf den Abdeckungsgrad des Untersuchungsraumes gemacht werden. Im Nachhinein erweist sich dieser Umstand allerdings stellenweise als vorteilhaft, da die so entstandenen multisaisonalen Datensätze innerhalb eines Jahrgangs weitere Analysemöglichkeiten eröffnen (vgl. Kap. 4, 5).

Der Praxisbezug der Arbeit konzentriert sich demnach auf folgende Punkte:

- Die Arbeit benutzt vorhandene, bewährte Fernerkundungsdaten und vermeidet dadurch hohen Kosten-, Zeit- und Arbeitsaufwand, der für aufwendige Vorstudien, Testanalysen sowie die Kalibration experimenteller Daten benötigt würde; Vor- und Nachteile der Daten sind bekannt, Lösungsmöglichkeiten stehen bereit (s.o.).
- Die verwendete Software wird weltweit von einem der Marktführer für die rechnergestützte Auswertung und Verarbeitung von Fernerkundungsdaten vertrieben. Folglich ist die Software nicht durch „Kinderkrankheiten“ belastet. Sie ist keine spezielle Eigenentwicklung z.B. einer Forschungsinstitution und kann bei entsprechender Fachkenntnis in jedem Büro/in jeder Kommune eingesetzt werden. Die benötigten Segmente der Software können projektbezogen zugeschnitten werden. Dieser Vorteil bescheinigt dem Ansatz der Arbeit ebenfalls große Praxisnähe.

Zusammenfassend können die Rahmenbedingungen der Arbeit als praxisnah bezeichnet werden. Schwierigkeiten und Probleme sind im üblichen Umfang aufgetreten. Sie sind mit nachvollziehbaren und in der Praxis umsetzbaren Lösungen minimiert und eliminiert worden. Unter diesen Voraussetzungen wird das Hauptziel der Arbeit, die Entwicklung einer praxisorientierten Handlungsanweisung zur Auswertung von Fernerkundungsdaten für Fragen des Umweltmonitoring verfolgt.

## 2 Rahmenbedingungen

### 2.1 Das Untersuchungsgebiet

#### 2.1.1 Auswahlkriterien

Für die Arbeit (vgl. Kap. 1.4: Ziele) muß das Untersuchungsgebiet folgende Kriterien erfüllen:

- Der Raum sollte sich durch eine hohe Dynamik, die durch die verschiedensten Ansprüche an den Raum induziert wird, auszeichnen. Hier hat der Umwelt- und Naturschutz eine große Verantwortung. Daher sind vielfältige Aufgaben im Rahmen von Umweltmonitoringverfahren zu bewältigen. Demzufolge erscheint eine Studie zur rechnergestützten Nutzung von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringaufgaben geboten, um Optimierungsmöglichkeiten in Bereichen des Umwelt- und Qualitätsmanagement zu eröffnen (s.o.).
- Die Charakteristika und Problematiken des Raums sollen zu einem hohen Grad repräsentativ bzw. in ihrer Ausprägung typisch sein, so daß die entwickelten Verfahren und Methoden für Fragen des Umweltmonitorings als alltägliche Routinen in Umweltmonitoringverfahren eingesetzt werden können und nicht auf selten auftretende Phänomene abgestimmt sind.
- Daten, die für die Analysen notwendig sind wie Kartenwerke, Statistiken, meteorologische Untersuchungen, Fernerkundungsdaten oder Textquellen sollten in einem ausreichenden Umfang vorhanden sein - zumal die Praxis immer wieder zeigt, daß die Datenlage „idealerweise besser sein könnte“.
- Hinzu kommt, daß der Untersuchungsraum gut erreichbar sein sollte, so daß Geländearbeiten wie z.B. stichprobenartige Überprüfungen von Vegetationseinheiten schnell durchgeführt werden können.

Am Nordrand des Ruhrgebiets liegt ein Untersuchungsareal, das alle oben genannten Kriterien erfüllt. Dieser Raum ist aufgrund seiner Lage und Ausprägung einem hohen Nutzungsdruck durch anthropogene Nutzungen einerseits wie auch Nutzungsansprüchen und der Sicherung von Gebieten für den Natur- und Landschaftsschutz andererseits ausgesetzt. Die große Variation an Nutzungen von Naherholung, Wochenendtourismus, sozial gehobener Wohngebiete, Industrie- und Gewerbeflächen oder auch Verkehrsinfrastruktur etc. führt zu vielfältigen räumlichen Konflikten mit dem Natur- und Landschaftsschutz. Das daraus entstehende Konfliktpotential ist ein typisches Phänomen für diese Ballungsrandzone. Zur Beobachtung und Kontrolle der Entwicklungen sowie zur Bereitstellung von Informationen für Lösungsansätze sind Monitoringverfahren ideal. Darüber hinaus ist das Areal für Geländearbeiten gut zu erreichen und die Datenlage kann als ausreichend eingestuft werden.

Abbildung 2.1 verdeutlicht noch einmal den Ablauf der vorliegenden Studie. Die Wahl des geeigneten Untersuchungsraums erfolgt unter Punkt 2.

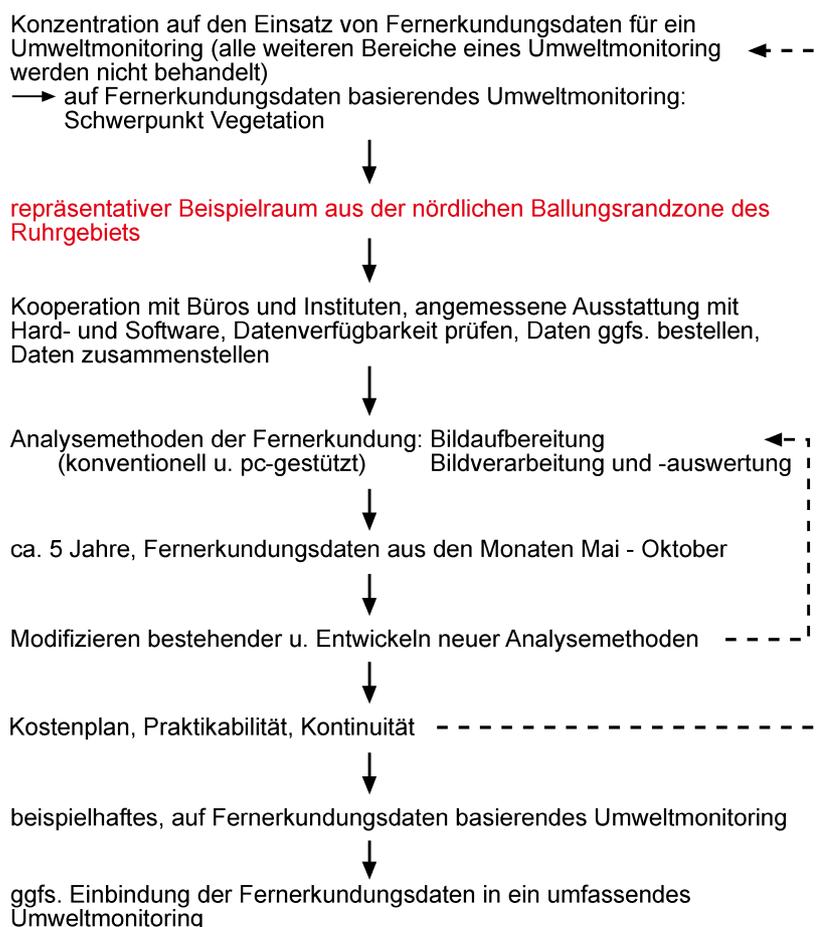


Abb. 2.1: Beispielhaftes Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme

Das entscheidende Auswahlkriterium ist die hohe Dynamik dieses Raumes, da sie ein kontinuierliches Monitoring der verschiedenen akut auftretenden Phänomene wie auch grundsätzliche Langzeitstudien zur Beobachtung und Erfassung von Veränderungen und Prognosen über mögliche Entwicklungen erfordert. Dies gilt um so mehr, da Veränderungen in der Umwelt tendenziell in immer kürzeren Zeitintervallen auftreten. Für diese Arbeit, die praxisrelevante rechnergestützte Verfahren und Methoden zur Nutzung von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringaufgaben entwickelt und prüft, wurde deshalb das Beispielareal bei Haltern in Westfalen ausgewählt (s. u.).

Aufgrund des fernerkundlich basierten Monitorings soll das Untersuchungsgebiet nicht im klassischen Sinn physisch- und siedlungsgeographisch charakterisiert werden. Vielmehr lehnt sich die Vorstellung des Untersuchungsraums an Kriterien des Raums an, die für eine Auswertung der Luft- und Satellitenbilddaten relevant sind. Hierzu gehört jeweils die aktuelle Ausprägung der Vegetation, der Gewässer und oberflächennahen sonstigen Gewässerstrukturen wie z.B. Flächen mit sehr geringen Grundwasserflurabständen, der Verkehrswege, der landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich genutzten Flächen sowie der Siedlungs-, Gewerbe- und Industrieflächen. Die Böden sind von nachrangigem Interesse, da sie nur vereinzelt durch Fernerkundungsdaten oberflächensichtbar sind und in der Regel durch

landwirtschaftliche Nutzung und Bearbeitung anthropogen überformt sind. Da das Georelief für das Untersuchungsgebiet keine Besonderheiten aufweist, wird es nur kurz behandelt.

Geologie, Hydrologie, Klimatologie oder auch Siedlungshistorie werden nicht behandelt, da sie für die Fragestellungen dieser Arbeit nicht relevant sind. Im Vordergrund steht der aktuelle Zustand des Untersuchungsraumes, wie er auch in den Fernerkundungsdaten dokumentiert wird.

### 2.1.2 Das Untersuchungsgebiet: relevante physisch-geographische Merkmale

Der Untersuchungsraum liegt am Nordrand des Ruhrgebietes bei Haltern in Westfalen und umfaßt eine Gesamtfläche von circa 216 km<sup>2</sup> (Gauß-Krüger-Eckkoordinaten: RW: <sup>25</sup>72-<sup>25</sup>90, HW: <sup>57</sup>26-<sup>57</sup>38, siehe Karte 2.1). Dadurch, daß einerseits die Fernerkundungsdaten, vor allem die Luftbildmosaike nur für eine kleine Teilfläche des gesamten Raums zur Verfügung stehen und andererseits die zusätzlichen Informationsquellen wie z.B. die ATKIS-Daten (ATKIS: Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem) nur für eine Fläche von 70 km<sup>2</sup> zur Verfügung stehen, sind Analysen nur für Teilgebiete des Gesamt-raums möglich. Abbildung 2.2 visualisiert diese Teilgebiete.

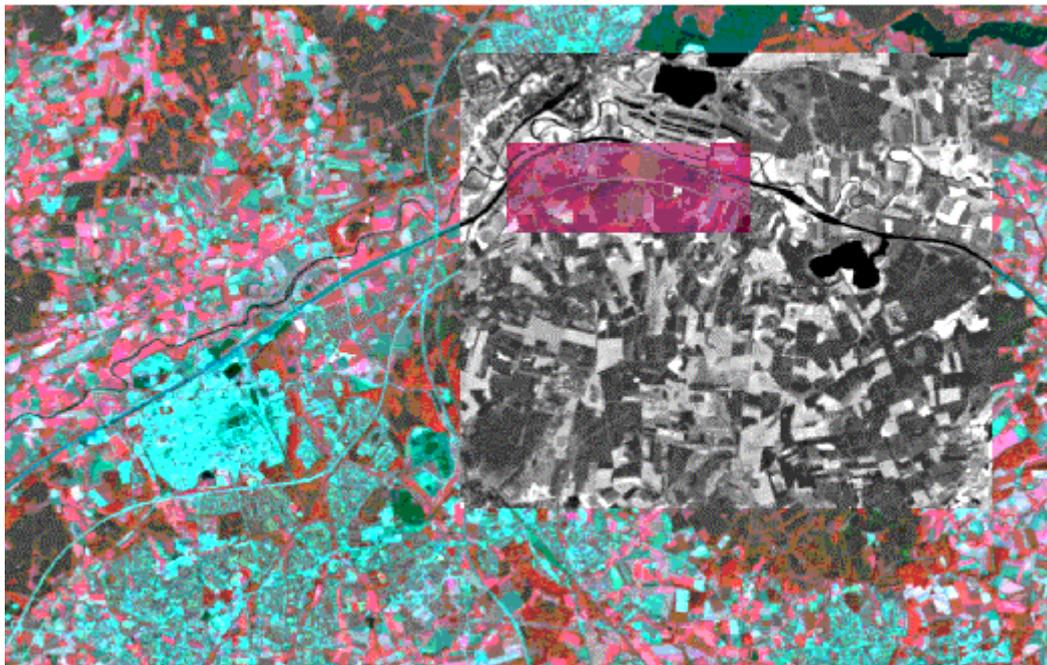
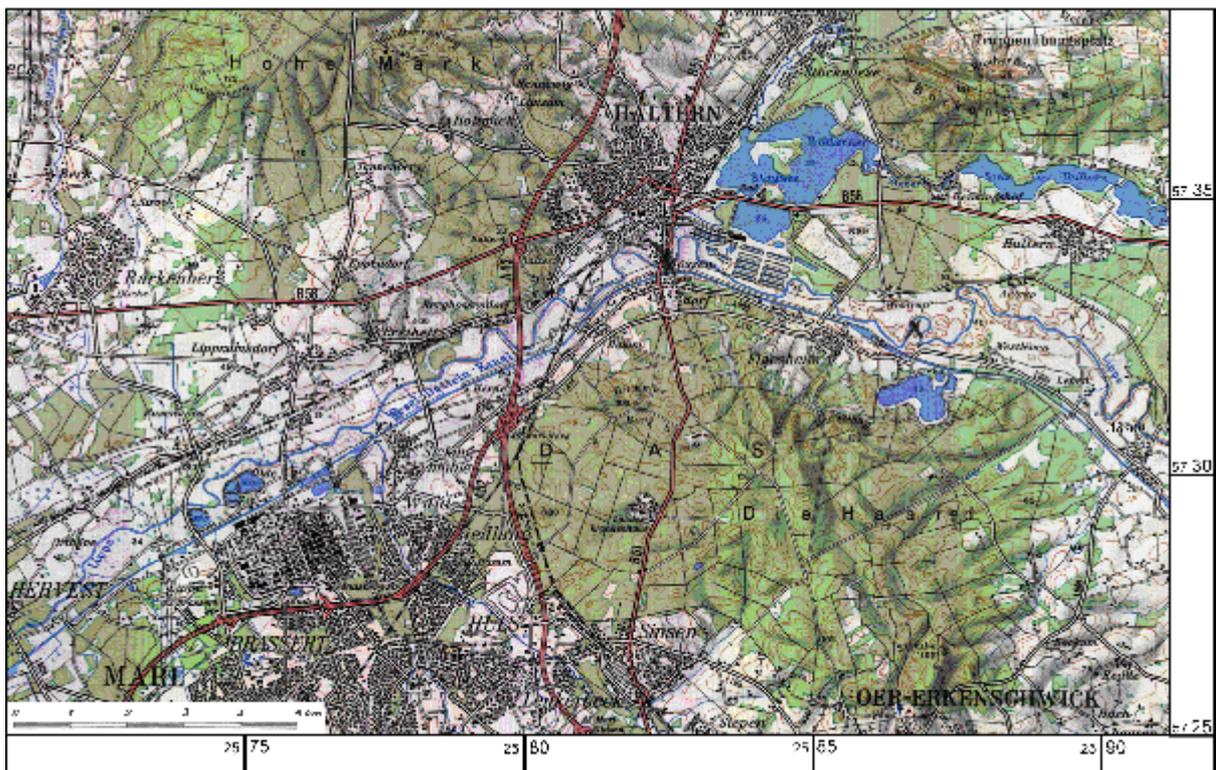


Abb. 2.2: Darstellung der verschiedenen Teiluntersuchungsräume: Luftbildabdeckung: innenliegender farbiger Bereich; Abdeckung durch ATKIS-Daten: schwarz-weiß gefärbter Bereich; Satellitenbildabdeckung: äußerer farbiger Bereich. Datenquellen: Landsat TM-Ausschnitt vom 02.07.91, Kanalkombinationen 432 und TM-Kanal 4, CIR-Luftbildmosaik vom 25.07.1985

Das Gebiet ist Teil des Westmünsterlandes, das dem größeren Naturraum der Westfälischen Tieflandsbucht angehört (vgl. auch MEYNEN et al. 1962: Kartenteil). Die Tieflandsbucht wird als Ausbuchtung der norddeutschen Tiefebene im Norden und Nordosten von Teutoburger Wald und Eggegebirge sowie nördlich vorgelagert von Osnabrücker und Bielefelder Osning umrahmt. Nach Süden und Südwesten wird die Bucht durch das Süderbergland mit aufliegendem Haarstrang und Ardeygebirge begrenzt; nach Westen und Nordwesten geht die Bucht in den Westteil des Nordmitteleuropäischen Tieflandes über (vgl. Karte 2.1 bzw. Karte A.1, Anhang A).

Karte 2.1: Der Untersuchungsraum



Quelle: LANDESVERMESSUNGSAMT NRW 1990

Die Stadt Haltern wird von drei Hügellandschaften umrahmt: die Borkenberge mit 134 m und die Hohe Mark mit 145 m im Norden und die Haard mit 156 m im Süden (vgl. auch KUTTLER & SCHREIBER 1984, S. 9 ff.; DEGE & DEGE 1983, S. 13 ff.).

Die Lippe, die als typischer Flachlandsfluß in Ost-West-Richtung stark mäandrierend das Untersuchungsgebiet durchfließt, erreicht mit dem Durchbruch durch dieses Hügelgebiet ihren Unterlauf (weiterführend hierzu: HERGET 1997, S. 4 ff.; STRUCKMEIER 1990, S. 37 ff.; MÜLLER-WILLE 1966, S. 10 ff.; KRAKHECKEN 1939, S. 6 ff.; HEINRICHSBAUER 1936, S. 17 ff.). Der Fluß wird von ausgedehnten Auenbereichen begleitet (vgl. auch HERGET 1997, S. 4 ff.; GEOLOGISCHES LANDESAMT, GLA, 1975, S. 113 f.).

Im Untersuchungsgebiet, das sich entlang des Lippeunterlaufs zwischen Lippe-km 112,5 bis 138,5 erstreckt, bilden die Stever und der Halterner Mühlenbach die Hauptzuflüsse der

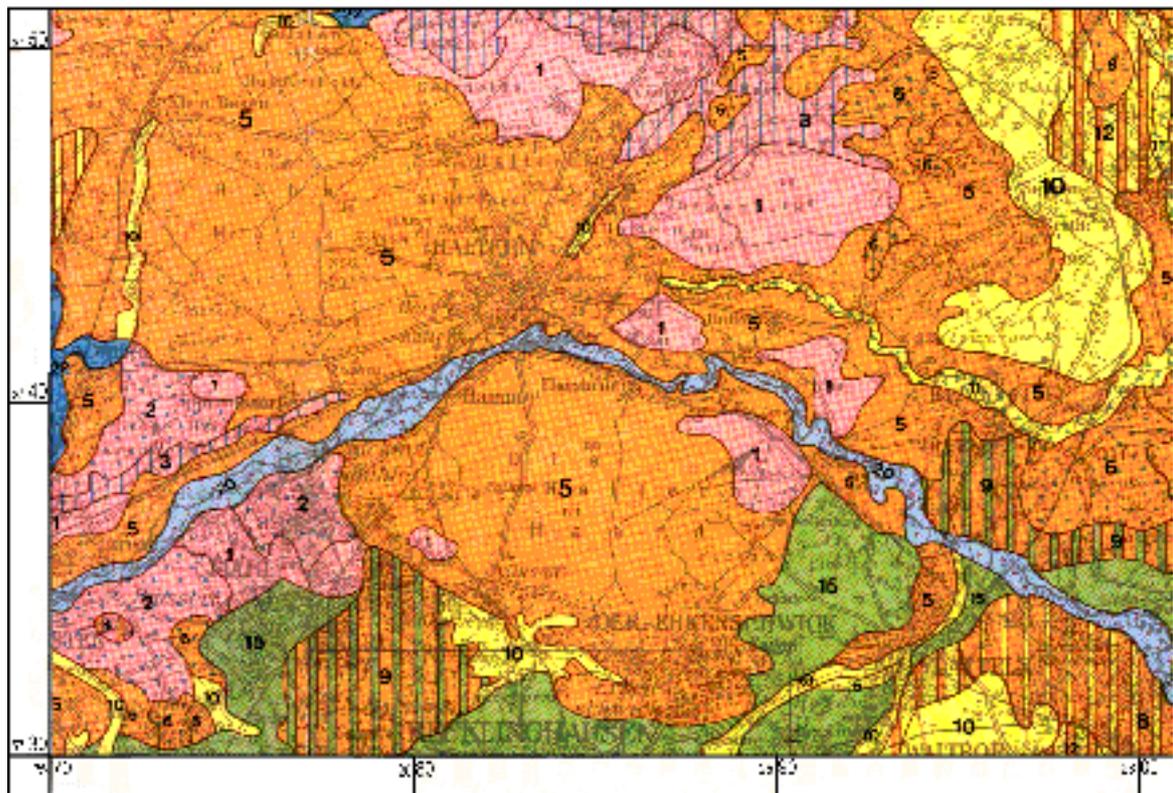
Lippe. Die Stever mündet nach dem Durchfließen des Halterner Stausees, der mit den sich südlich anschließenden Filterbecken der Trinkwassergewinnung dient, als einziger größerer von Norden kommender Nebenfluß bei Haltern in die Lippe. Von Süden her gibt es im Untersuchungsraum mehrere kleiner Zuläufe, so der Sickingmühlbach, der Gernebach oder der Mahlenburger Mühlengraben (siehe auch HERGET 1997, S. 5; LIPPEVERBAND 1988, S. 13 f.).

Bergbaubedingt treten hier sowohl in der oberflächlich sichtbaren Gewässerlandschaft als auch in der Grundwasserlandschaft Bergsenkungen auf, die ober- wie unterirdisch zu veränderten Wasserverhältnissen führen (vgl. auch LIEDTKE & MARCINEK 1994, S. 132 ff.; NOLL 1987, S. 8 ff.; HILDEN 1975, S. 3 ff.; HILDEN & SUCHAN 1974, S. 47 ff.). Die Lippe ist im Untersuchungsraum durch Folgen des untertägigen Bergbaus streckenweise eingedeicht. Beidseitig der Lippe verlaufen Deiche von der K 22 (Lippe-km 134,5) bis zur K 55 (Lippe-km 137,5); einseitig verläuft der Deich noch bis auf Höhe der Klärteiche bei Ölde (Lippe-km 138,5). Der von Süden zufließende Sickingmühlbach (Lippe-km 136) ist ebenfalls eingedeicht. Die Lippe verfügt im Bereich des Untersuchungsareals über eine starke Uferbefestigung durch Deck- oder Packwerk. Parallel verläuft der von der Berufsschiffahrt stark genutzte Wesel-Datteln-Kanal. Hinzu kommen zahlreiche kleinere, zum Teil verrohrte Bäche sowie einige Stillgewässer (private Teiche, Klärteiche etc.).

Im Lippeauenbereich herrschen Auengleye vor. Die anderen Fließgewässer und Talungen werden von Gleyen oder Pseudogleyen begleitet. Großflächig im Gebiet der Haard verteilt sind Podsole und Braunerden, Löß tritt nur vereinzelt auf. Plaggenesch als anthropogen überformter Boden ist im Lippeauenbereich verbreitet (weiterführend hierzu: GLA 1987: Bodenkarte; SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL 1989, S. 414 ff.). Die Niederterrassenflächen der Lippe setzen sich vorwiegend aus Talsanden zusammen. Die größte Verbreitung finden im Untersuchungsraum die Fazies der Recklinghäuser Sandmergel sowie die der Halterner Sande aus der Kreide. Sie beherrschen große Teile der Haard und des Kreisforstes Recklinghausen bei Berghaltern.

In der Lippeaue herrscht auf den oben genannten Bodentypen als potentielle natürliche Vegetation (pnV) Eichen-Auenwald bzw. Eichen-Hainbuchenwald und Erlenbruchwald vor (vgl. TRAUTMANN 1972; BURRICHTER 1973; Kartenteile, vgl. auch Karte 2.2). Daran schließt sich über Strecken auenbegleitend sowie z.B. auch für die Haard und die Hohe Mark der Typ des Trockenen Eichen-Buchenwaldes als pnV an. Inselartig verteilt im Bereich der Borkenberge, bei Hullern sowie südwestlich von Ahsen wird Trockener Eichen-Birkenwald, stellenweise mit Eichen-Buchenwald als pnV ausgewiesen (BURRICHTER 1973). Bei Lippramsdorf und südlich davon bei Hüls wird dieser Typ stellenweise durch den Feuchten Eichen-Birkenwald abgelöst. Im Süden grenzen an das Waldgebiet der Haard artenärmere und artenreiche Sternmieren-Stieleichen-Hainbuchenwälder mit Eichen-Buchenwald als Vegetationstypen der pnV-Typen an (vgl. TRAUTMANN 1972; BURRICHTER 1973; Kartenteile, vgl. Karte 2.2).

Karte 2.2: Die pnV im Untersuchungsraum



## Ausschnitt aus der Zeichenerklärung:

0 2 4 6 8 10 km

<b>Eichen-Birkenwälder <i>Quercus-Betuletum</i></b>		<b>Eichen-Hainbuchenwälder <i>Stellaria-Carpinetum</i></b>	
1	Trockener Eichen-Birkenwald	10	Brennkeim-Eichen-Hainbuchenwald, vorwiegend orienum
2	Feuchter Eichen-Birkenwald, z. T. mit Eichen-Eichen-Birchwald-Übergängen	11	Stärkeren Eichen-Hainbuchenwald, vorwiegend artemisch
3	Erlen-Eichen-Birkenwald	12	Vorwiegend artenreicher Eichen-Hainbuchenwald mit Buchen-Eichenwald-Übergängen
4	Entwässert feuchter Eichen-Birkenwald mit Buchen-Eichenwald-Übergängen	<b>Buchenwälder <i>Fagion silvariae</i></b>	
<b>Buchen-Eichenwälder <i>Fago-Quercetum</i></b>		15	Flattergras-Buchenwald, z. T. mit Eichen-Hainbuchen- oder Buchen-Eichenwald-Übergängen
5	Trockener Buchen-Eichenwald	<b>Auen- und Niederungswälder</b>	
6	Feuchter Buchen-Eichenwald	20	Eichen-Auenwald, z. T. mit Eichen-Hainbuchenwald oder Eichen-Birchwald-Übergängen
7	Verwechelt Buchen-Eichenwald mit Buchen-Hainbuchenwald-Übergängen	22	Traubeneichen Erlen-Eichenwald
8	Buchen-Eichenwald mit Übergängen zum Typengras-Buchenwald		

Quelle: BURRCHTER, E. 1973

Die pnV ist nach TÜXEN (1956, zit. nach KLINK 1996, S. 83) ein theoretisches Konstrukt, das wie folgt definiert wird: Die pnV ist die „gedachte höchstentwickelte Vegetation, die sich bei Aufhören des menschlichen Einflusses auf Grund der gegenwärtigen Umweltbedingungen (Standortbedingungen) ‚schlagartig‘ einstellen würde“. „Die Waldgesellschaften sind ... das Symbol für das gesamte Vegetationspotential der von ihnen eingenommenen Standorte, also auch für die verschiedenen anthropogenen Pflanzengesellschaften“ (TRAUTMANN 1972). Die Einheiten der pnV sind Ausdruck des derzeitigen ökologischen Potentials der Wuchsräume. Durch ihre typische Wiederholung ermöglichen sie ökologische Vergleiche.

Exemplarisch wird dies bestätigt durch Informationen aus den Realnutzungskartierungen und Bestandskartierungen zu Biotoptypen des BÜROS FROELICH & SPORBECK, Landschafts-, Orts- und Umweltplanung im Rahmen der Umweltverträglichkeitsstudien „Auguste Victoria“ und „Olfen“ sowie die Ökologischen Gutachten zum „Rahmenbetriebsplan Blumenthal/Haard“ (Kartenteil: 1998a, 1998b). Seitens des Auftraggebers DSK (Deutsche Steinkohle AG) wurde mir Einsicht in die entsprechenden Gutachten und Pläne gewährt. Diese Informationsquellen dürfen jedoch nicht in graphischer Form im Rahmen dieser Arbeit präsentiert und genutzt werden.

Aus den genannten Quellen ist abzuleiten, daß in weiten Teilen des Untersuchungsraums Buchen-, Eichen- sowie Buchen-Eichen-Mischwälder als Laubwaldtypen vorherrschen. Daneben sind Pappelwälder, Birken(Bruch)wälder oder Ahornmischwälder zu finden. Nadelwald setzt sich in dem Gebiet vorwiegend aus Kiefern, Fichten, Lärchen zusammen. Alle genannten Nadelbäume sind künstlich durch die Forstwirtschaft eingebracht.

Große Flächen werden als Ackerflächen genutzt, die zum Teil mit Brachflächen durchsetzt sind. Wiesen und Weideflächen liegen bevorzugt im Lippeauenbereich. Im Nordosten des Areals befindet sich die Westruper Heide. Kleinstrukturen wie Kleingehölze, Moore, Gärten, Böschungen, Abgrabungen/Aufschüttungen oder Park/Grünanlagen bleiben in dieser Übersichtsdarstellung unberücksichtigt.

### 2.1.3 Das Untersuchungsgebiet: relevante siedlungsgeographische Merkmale und anthropogene Einflüsse

Im gesamten Untersuchungsraum wurde und wird untertägig Steinkohlenbergbau betrieben. Dies führt sowohl großflächig als auch lokal zu Bergschäden, die häufig als Bergsenkungen ausgeprägt sind. Die Halterner Sande werden an verschiedenen Standorten im Tagebau gewonnen; der Halterner Stausee und dessen Umgebung dienen der Trinkwassergewinnung. Weite Teile der Haard, der Hohen Mark sowie der Westruper Heide und des Halterner Stausees werden für die Naherholung und den Wochenendtourismus stark genutzt.

Das Gebiet verfügt über vier größere Siedlungsflächen: im Westen die Stadt Marl, im Süden grenzen Teile von Recklinghausen, im Südwesten die Stadt Oer-Erkenschwick und im Norden die Stadt Haltern an das Untersuchungsgebiet an. Im Vergleich zu Oer-Erkenschwick und Marl (ca. 93.093 Einwohner) verfügen Haltern (ca. 36.477 Einwohner) und Recklinghausen (ca. 125.324 Einwohner) über historische Siedlungskerne, die das aktuelle Stadtbild prägen. Marl ist geprägt durch stark verstreut liegende Vororte und umschließt die Anlage CWH (Chemische Werke Hüls) von Westen über Süden bis nach Osten fast vollständig. Daneben liegen entlang des Wesel-Datteln-Kanals verschiedene kleine Siedlungskerne wie Hamm, Bossendorf, Flaesheim oder Ahsen. Aufgrund der ländlichen Grundstruktur des Gebietes sind Streusiedlungen (z.B. Redde, Westleven) und Einzelgehöfte weit verbreitet.

Die Verkehrsinfrastruktur des Raums ist sehr gut ausgebaut. Neben dem Wesel-Datteln-Kanal als wichtigem Wasserweg vor allem für die CWH ist die Anbindung des Gebietes durch überregionale Verkehrswege wie Kreisstraßen, Bundesstraßen und die A 52 sowie die A 43 gesichert. Das gleiche gilt für die Anbindung an den Schienenverkehr (Internet-Recherche: [www.haltern.de](http://www.haltern.de), [www.recklinghausen.de](http://www.recklinghausen.de), [www.marl.de](http://www.marl.de)).

Dem stehen Bemühungen, Projekte wie auch bereits festgesetzte Flächen im Rahmen des Natur- und Umweltschutzes gegenüber. Im Bereich des Untersuchungsareals liegen mehrere Landschaftspläne in unterschiedlichen Umsetzungsstadien vor. Ebenso sind Naturschutzgebiete sowie Biotop- und Biotopverbunde mit landesweiter und regionaler Bedeutung ausgewiesen. Zwar werden im Rahmen dieser Arbeit Daten für diesen Themenkomplex bereitgestellt; er ist jedoch nicht Bestandteil der Untersuchungen und soll daher nicht weiter vertieft werden.

## 2.2 Die Informationsquellen

Dank der Kooperationsbereitschaft verschiedener Stellen wie der DSK - Abteilung DG in Bottrop, dem KOMMUNALVERBAND RUHRGEBIET (KVR) in Essen, dem LIPPEVERBAND in Dortmund, der LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE Bezirksstelle für Agrarstruktur Ruhrgebiet in Unna, dem DWD (DEUTSCHER WETTERDIENST) - Regionales Gutachterbüro in Essen, dem KREIS RECKLINGHAUSEN - Katasteramt und Büro des Landrates: Regionale Strukturentwicklung und gesamtträumliche Planung sowie dem GUTACHTERBÜRO FROELICH & SPORBECK in Bochum konnten Daten und Informationen bereitgestellt und zusammengetragen werden. Abbildung 2.3 dokumentiert den aktuellen Arbeitsschritt im Rahmen der Studie.

Es handelt sich um folgende Datentypen:

- Thematische und Topographische Karten bzw. Kartenwerke,
- Statistiken, meteorologische und phänologische Daten,
- Fernerkundungsdaten: Luft- und Satellitenbilddaten,
- Literaturquellen (vgl. Literaturverzeichnis).

Im folgenden werden die benutzten Informationsquellen aufgeführt und bewertet. Darüber hinaus bietet die Aufstellung eine Orientierung für ähnlich ausgerichtete Untersuchungen und deren Informationsbedarf.

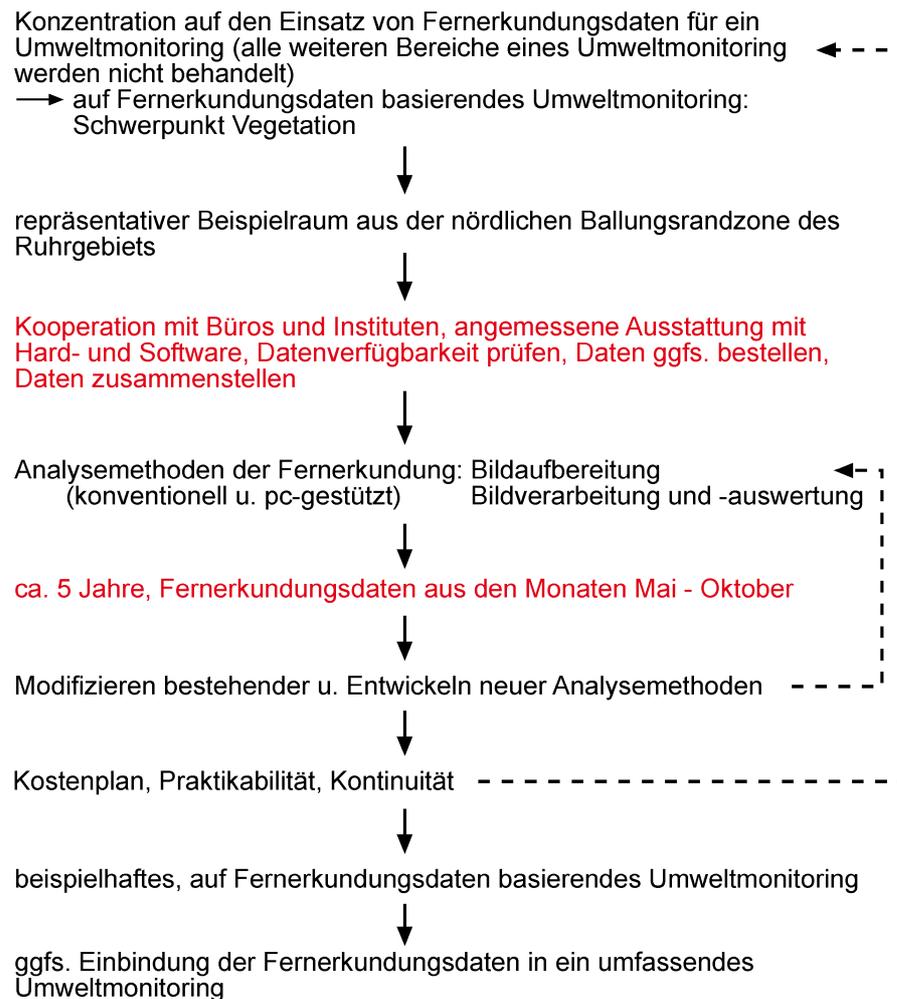


Abb. 2.3: Beispielhaftes Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme

## 2.2.1 Thematische und Topographische Karten und Kartenwerke

Folgende Unterlagen werden benutzt:

- ATKIS-Daten: DLM 25 mit den Informationsschichten: Vegetation, Siedlung, Verkehr, Gewässer, Gebiete vom LVA NRW (DLM: Digitales Landschaftsmodell; LANDESVERMESSUNGSAMT NRW 2000),
- digitale DGK5 vom KREIS RECKLINGHAUSEN, KATASTERAMT (2000; Genehmigung Nr. 2608 v. 03.03.2000),
- Karte der potentiellen natürlichen Vegetation nach TRAUTMANN (1972),
- Karte der potentiellen natürlichen Vegetation nach BURRICHTER (1973),
- Karte der Naturräumlichen Gliederung Deutschlands von MEYNEN et al. (1962),
- Synthetische Klimafunktionskarte Ruhrgebiet vom KVR (1992),
- Karte der Wuchsklimate des Ruhrgebiets und angrenzender Bereiche vom KVR (1985),
- Lippeauenprogramm vom LIPPEVERBAND (1995): Karte 1: Bestandserfassung und Bewertung,

- Karten der landwirtschaftlichen und forstbehördlichen Fachbeiträge 184, Dorstener Ebene und 156, Raum Seengebiet Haltern von der LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE und HÖHERE FORSTBEHÖRDE (1985, 1981),
- Hydrogeologische Karte NRW 1:100.000, Blatt C 4306 Recklinghausen vom GLA (1975/1990),
- Geologische Karte NRW 1:100.000, Blatt C 4306 Recklinghausen vom GLA (1975/1990),
- Bodenkarte NRW 1:50.000, Blatt L 4308 Recklinghausen vom GLA (1987),
- Ökologisches Gutachten zum Rahmenbetriebsplan Blumenthal/Haard: Karte 5: Realnutzung nach Biotoptypen, BÜRO FROELICH & SPORBECK (1995),
- UVS zur Steinkohle-Abbauplanung Auguste Victoria: Karte 1: Bestand, Biotoptypen und Planungen, BÜRO FROELICH & SPORBECK (1998a),
- UVS zur Steinkohle-Abbauplanung Olfen: Karte 5.12: Ökologische Situation an Lippe und Stever, BÜRO FROELICH & SPORBECK (1998b).

Die Karten und Kartenwerke haben unterschiedliche Herstellungsdaten und sind dabei zum Teil recht alt. Da aber für die meisten Thematiken keine oder kaum Veränderungen in den vorgegebenen Zeiträumen zu erwarten sind (Karte der potentiellen natürlichen Vegetation, Bestandskarten von 1995 z.B.), sind die vorliegenden Werke adäquate Informationsgrundlagen. Die meisten dieser Karten liegen in kleinen Maßstäben vor und dienen nur der Übersicht (vgl. Geologische Karte oder Bodenkarte). Die DLM-25-Daten, die als digitaler Datensatz vorliegen, verfügen über eine Lagegenauigkeit von  $\pm 3$  m. Dabei sind die Daten an den Maßstab 1:25.000 angelehnt. Die Karten des BÜROS FROELICH & SPORBECK hingegen zeigen mit Maßstäben von 1:5.000 und 1:10.000 eine höhere Detailauflösung und eignen sich als zusätzliche Quellen sehr viel besser.

### 2.2.2 Meteorologische und phänologische Daten und Statistiken

Die meteorologischen Daten, die für die Rekonstruktion der Phänologie der Vegetation erforderlich sind, werden vom DWD in Essen dankenswerterweise unentgeltlich für Forschungszwecke zur Verfügung gestellt; die phänologischen Daten werden beim DWD in Offenbach bezogen. Die Daten zu den Klimaelementen Temperatur und Niederschlag an der Klimastation Herten (früher Recklinghausen) vom DWD in Essen und in Offenbach werden für die Jahre 1955-1997 ausgewertet. In Kombination damit werden phänologische Daten für ausgewählte Baum- und Getreidearten für die Jahre 1985, 1986, 1990 und 1991 analysiert. Die Untersuchungen dienen der Charakterisierung der zu erwartenden phänologischen Entwicklungsstadien der Vegetation zu den einzelnen Aufnahmezeitpunkten der Fernerkundungsdatsätze. Darüber hinaus werden Aerologische Daten für die Atmosphärenkorrektur benötigt (vgl. Kap. 3.2).

Hierfür werden folgende Datenquellen verwendet:

- Phänologische Daten für den Naturraum 544 des DWD Offenbach,
- Meteorologische Daten der Klimastation Herten des DWD Essen,
- Aerologische Wettermeldungen des Europäischen Wetterberichts des DWD für die Station Essen vom 01.05., 17.05.1986 und 02.07.1991.

Während die Jahre 1985, 1986 und 1991 phänologisch betrachtet allgemein als normal verlaufend anzusprechen sind, setzen für 1990 die phänologischen Entwicklungsphasen sehr viel früher ein. Dies korreliert sehr eng mit der im Vergleich zu den anderen Jahren abweichenden Entwicklung der Klimatelemente Niederschlag und Temperatur für das Jahr 1990 (vgl. Tab. A.11 - Tab. A.16, Diagr. A.1 - A.6, Anhang A; vgl. Kap. 4.1).

### 2.2.3 Fernerkundungsdaten

Für die multisensoralen, multiskalaren und multitemporalen Analysen werden folgende Luft- und Satellitenbilddaten verwendet:

Tab. 2.1: Verwendete Luftbilddatensätze

Filmqualität	Datum	Maßstab	Bezugsquelle
CIR-Film, Diapositiv	25.07.1985	ca. 1:5.000	KVR
Color-Film, Papierabzug	05.05.1990	ca. 1:12.500	KVR
Color-Film, Papierabzug	13./14.10.1990	ca. 1:6.000	Lippeverband
Color-Film, Papierabzug	26.10.1991	ca. 1:4.000	Lippeverband

Tab. 2.2: Verwendete Satellitenbilddatensätze

Sensor	Datum	Szene	Bezugsquelle
Landsat-5-TM	01.05.1986	196/24	DSK, Abt. DG
SPOT	01.05.1986	K/J: 46/245	DSK, Abt. DG
Landsat-5-TM	17.05.1986	196/24	DSK, Abt. DG
Landsat-5-TM	02.07.1991	196/24	DSK, Abt. DG
Landsat-5- MSS	02.07.1991	196/24	Geogr. Inst., RUB

Die Luftbilddatensätze sind insgesamt wolkenfrei. Der CIR-Luftbilddatensatz ist 1985 für Untersuchungen des Forstgebietes Haard erstellt worden und deckt im Rahmen des gesamten Untersuchungsgebietes nur einen nördlich im Areal gelegenen Teilbereich ab (Gauß-Kürger Koordinaten: RW: <sup>25</sup>80-<sup>25</sup>88, HW: <sup>57</sup>26-<sup>57</sup>32). Die radiometrische und geometrische Qualität der Bilder ist ausreichend, obwohl sich der Randabfall der Bilder sowie die unterschiedliche Farbqualität der Diapositive auf den Mosaikiervorgang negativ auswirkt (Kap. 3.1).

Die Luftbilder von 1990 sind Teil einer ruhrgebietsweiten Befliegung des KVR und decken den Untersuchungsraum vollständig ab. Für alle Bilder ist ein starker Randabfall auffällig. Die Bilder lassen sich jedoch aufgrund der großen Überlappungsbereiche gut mosaikieren (Kap. 3.1). Allerdings wirkt sich die grobe Körnung, die unter anderem durch das Vervielfältigungsverfahren bedingt ist, negativ auf die radiometrischen Eigenschaften der Luftbilder und folglich auf die Detailerkennbarkeit aus.

Die Luftbilder, die der LIPPEVERBAND im Rahmen einer ersten Geländeorientierung zur Verfügung gestellt hat, weisen insgesamt eine gute bis sehr gute Qualität auf und sind für Orientierungsarbeiten (stereoskopische Auswertungen im Rahmen der ersten Orientierung im Untersuchungsraum) hervorragend geeignet. Da diese Luftbilder für Bestandserhebungen im Rahmen des Lippeauenprogramms (1995) hergestellt worden sind, decken sie für das Untersuchungsgebiet nur den Lippeverlauf und angrenzende Bereiche ab.

Für die rechnergestützte Auswertung werden aus dem CIR-Luftbilddatensatz und dem Color-Luftbilddatensatz von 1990 Teilareale gescannt und mosaikiert, so daß letztlich beispielhaft das Areal mit den Gauß-Krüger-Koordinaten RW:  $25^{\circ}8077' - 25^{\circ}8489'$ , HW:  $57^{\circ}3182' - 57^{\circ}3340'$  für die CIR-Luftbilder und die Color-Luftbilder digital vorliegen (Details s. Kap. 3.1).

Das radiometrische und geometrische Auflösungsvermögen der verwendeten Satellitenbilddaten ist sensorbedingt unterschiedlich (siehe Tab. A.1, Tab. A.3 im Anhang A). Die radiometrischen Eigenschaften der Szenen werden jedoch zusätzlich durch die Aufnahmebedingungen, das heißt durch Atmosphäreinflüsse und Wetterbedingungen verfälscht.

Demzufolge sind die Satellitenbildszenen durch unterschiedliche Atmosphärensituationen charakterisiert. Die Szene vom 17.05.1986 ist durch schleierartige Bewölkung getrübt, während die weiteren Szenen für das Untersuchungsgebiet weitgehend bewölkungsfrei sind. Für diese Rohdaten wird somit eine Atmosphärenkorrektur erforderlich, um vergleichende Analysen durchführen zu können (vgl. Kap. 3.2.1).

## 2.3 Technische Ausstattung

Die vorliegende, pc-gestützte Arbeit wird mit Hilfe verschiedener Hardwarekomponenten und Peripheriebestandteile durchgeführt. Hinzu kommt der Einsatz verschiedener Softwarepakete. Die Ausstattung für diese Studie wird für einen derart gestalteten Arbeitsplatz - auch in einer Kommune oder in einem Büro - als ausreichend eingeschätzt (vgl. Tab. 2.3).

Tab. 2.3: Ausstattung mit Hard- und Software

Hard- und Software	optimal	Standard: normal	„sub“- optimal
<b>1. Hardware:</b>			
• PC, 350 MHz, Pentium II, 10GB-Festplatte, 256 MB Arbeitsspeicher		x	
• Bildschirm: 21 Zoll	x		
• CD-Brenner PlexWriter 8/20 (8-fach)		x	
• DIN A3-Farb-Drucker EPSON Stylus Plus 1200 (1440x720 dpi)		x	
• Plotter HP DesignJet 3000 CP	x		
• Digitalisierbrett DIN A0 Calcomp Drawing Board III			x
• Scanner Howtek Scanmaster 4500	x		
<b>2. Software:</b>			
• ERDAS Imagine 8.3.1 und 8.4 (PC-Version)		x	
• ATCOR2, Version 1.5.2 für ERDAS Imagine 8.3.1		x	
• Adobe Photoshop in der jeweils aktuellen Version		x	
• ArcView in der jeweils aktuellen Version		x	

### 1. Hardware:

Um die verschiedenen Arbeitsschritte weiter zu beschleunigen, die Rechen- und Arbeitszeiten zu verkürzen und eine weitgehende Unabhängigkeit von sonstigen gemeinsam genutzten Einrichtungen z.B. in einem Büro zu gewährleisten, kann die im folgenden aufgeführte Ausstattung als Orientierung dienen (alle Modellangaben sind Orientierungswerte, Stand: 3/2000). Falls die genannten Komponenten nicht vorhanden sein sollten, so ist eine Eranschaffung dringend geboten:

- PC, 700 MHz, Pentium III, 30GB-Festplatte, 512 MB Arbeitsspeicher,
- Bildschirm 19 oder 21 Zoll mit 3D-Graphikkarte Oxygen GVX1 AGP, 32 MB mit Stereobrille und Emitter NuVision 60GX,
- CD-Brenner z.B. PlexWriter: 8-fach,
- DIN A3-Farb-Drucker mit ca. 1440x720 dpi, verschiedene Papierqualitäten bis Photopapier und Folie inklusive verschiedener Druckqualitäten bis Photoqualität,
- Plotter z.B. HP DesignJet 3000 CP (Details s. Anhang A, Tab. A.18),
- Digitalisierbrett: nicht unbedingt notwendig: DIN A3 oder DIN A2,
- Scanner sollten aufgrund ihres Preises in der Benutzung gemietet oder gemeinschaftlich genutzt werden. Auf Basis dieser Arbeit kann der High-End Trommelscanner Howtek Scanmaster 4500 empfohlen werden: Scanfläche 27,9 x 29,9 cm, 4000 dpi (weitere Details s. Anhang A, Tab. A.17).

## 2. Software:

Die Programme Adobe Photoshop und ArcView könnte man auch als sogenannte „Peripherie-Software“ bezeichnen; sie sind durch ähnlich aufgebaute Programme austauschbar. Die Fernerkundungssoftware ERDAS Imagine hingegen läßt sich durch andere, am Markt etablierte Programme kaum ersetzen, da sie ein breites Spektrum der Datenverarbeitung bietet und dem Nutzer dabei ein hohes Maß an Selbständigkeit und Mitbestimmung z.B. bei der Parameterauswahl läßt. Viele andere Softwareprogramme wie zum Beispiel IDRISI eignen sich besser für den Lehrbetrieb an einer Hochschule als für praxisrelevante Untersuchungen. Die beschriebene Ausstattung wird im Zuge der Kalkulation der vorliegenden Arbeit (vgl. Kap. 7) erneut aufgegriffen; die dafür anfallenden Kosten fließen in die Berechnungen mit ein.

### 3 Vorprozessierung der Fernerkundungsdaten

Für die rechnergestützte Auswertung der Daten müssen zum einen die Luftbilddatensätze digitalisiert bzw. gescannt, geocodiert und anschließend zu Mosaiken zusammengefügt werden. Im Zuge dieses Prozesses werden die einzelnen Luftbilder untereinander radiometrisch harmonisiert. Zum anderen müssen die Satellitenbilddatensätze atmosphärisch korrigiert werden, bevor sie geocodiert und in ihrer Detailschärfe optimiert werden. Erst im Anschluß an diese Vorprozessierung stehen die Daten für vergleichende qualitative und quantitative Analysen eines Umweltmonitoringverfahrens zur Verfügung. Abbildung 3.1 verdeutlicht den Zeitpunkt der Datenvorprozessierung im Rahmen des gesamten Arbeitsablaufs.

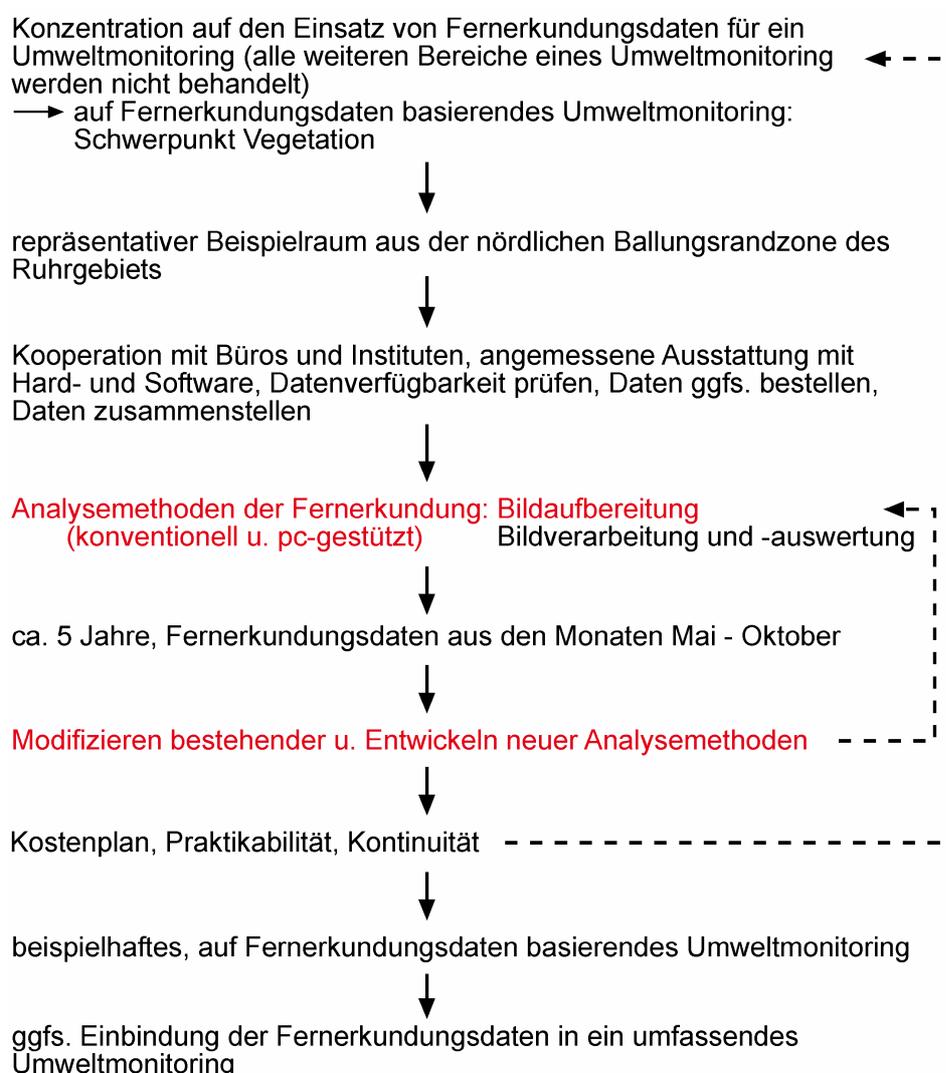


Abb. 3.1: Beispielhaftes Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme

### 3.1 Vorprozessierung der Luftbilddatensätze

Während die Luftbilddatensätze des LIPPEVERBANDS Dortmund (1990) nur der Erkundung/Einlesen (mit Hilfe eines Luftbildumzeichners der Firma Bausch & Lomb) des Kernbereichs des Untersuchungsraumes dienen und aus diesem Grund nicht weiter vorverarbeitet werden müssen, ist es notwendig, die analog vorliegenden Luftbilddatensätze des KVR (1985, 1990) für pc-gestützte Analysen vorzuprozessieren. Dies geschieht in zwei Schritten:

- a) Scannen der Luftbildsätze, also Analog-Digital-Wandlung,
- b) Georeferenzieren und Mosaikieren der Luftbildsätze.

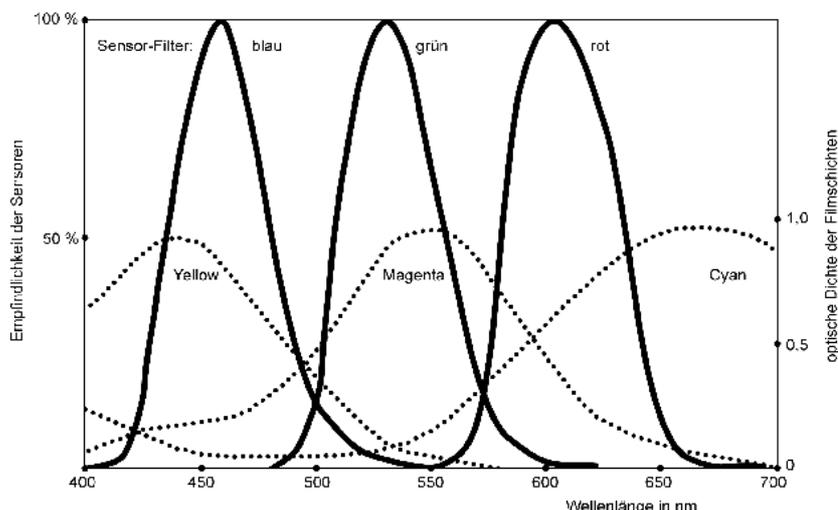
Zu a):

Die farbliche/radiometrische Qualität der einzelnen analogen Luftbildreihen wie auch einzelner Luftbilder in Bildreihen sind aus folgenden Gründen schwankend:

- Das Phänomen des Randabfalls führt zu Verschattungen eines Luftbildes zu den Randbereichen hin. Der Einfluß des Randabfalls kann durch Antivignetting-Filter minimiert werden (vgl. auch HERTEL et al. 1992, S. 181 f.; KLIMES & ROSS 1993, S. 209 f.; FENT et al. 1995, S. 281 f.; HILDEBRANDT 1996, S. 78 ff.).
- Objekte zeigen unterschiedliches Reflexionsverhalten je nachdem, ob sie im Mitlicht- oder Gegenlichtbereich einer Aufnahme liegen (vgl. auch FISCHER & v. KIENLIN 1987, S. 54; RUNKEL 1987, S. 311 ff.; HERTEL et al. 1992, S. 181 ff.; KLIMES & ROSS 1993, S. 209 f.; FENT et al. 1995, S. 281 f.; HILDEBRANDT 1996, S. 40 f.; ORTHABER 1997, S. 11 f.).
- Bei benachbarten Bildern liegen Objektgruppen in einem Bild im Mitlichtbereich und im benachbarten Bild im Gegenlichtbereich und umgekehrt. Ähnliches kann für die Lage von Objekten in verschatteten Bildbereichen (Randabfall) und in gut ausgeleuchteten Bildbereichen gelten (siehe auch FISCHER & v. KIENLIN 1987, S. 54; HILDEBRANDT 1996, S. 40 f.).
- Innerhalb einer Meßbildreihe (natürlich auch vergleichend bei mehreren Bildreihen) können atmosphärische Schwankungen (Stichwort Luftlichteinfluß) die Reflexionseigenschaften gleicher Objektgruppen, die in verschiedenen Aufnahmen abgebildet sind, wesentlich verändern (vgl. hierzu auch FISCHER & v. KIENLIN 1987, S. 53; HILDEBRANDT 1996, S. 127; weiterführend, aber in dem Maße für Luftbilder nicht zutreffend: vgl. Kap. 3.2).
- Außerdem kommt es zu Qualitätsschwankungen zwischen verschiedenen Filmchargen, durch verschiedene Umstände der Filmentwicklung sowie durch unterschiedliche Vervielfältigungsverfahren (vgl. auch FISCHER & v. KIENLIN 1987, S. 54 ff.; HILDEBRANDT 1996, S. 74 f., 102 f., 138 f.).

Hinzu kommt im Rahmen der Digitalisierung der analogen Luftbilder der Verlust bzw. die Verfälschung der radiometrischen Information der Aufnahmen. 24 Bit Farbtiefe für neu zu generierende dreikanalige digitale Luftbilder ist eine gängige Voreinstellung. Je nach Scanner sind jedoch die spektralen Empfindlichkeiten der Scannersensoren für die einzelnen Farbanteile (yellow, magenta, cyan respektive blau, grün, rot) nicht deckungsgleich mit der spektralen Empfindlichkeit der einzelnen Filmschichten (vgl. Abb. 3.2; siehe auch MURTHA &

WIART 1989, S. 83 ff.). Dies kann zum Teil durch den Einsatz von Filtern während des Scanvorgangs aufgefangen werden; ein Informationsverlust ist jedoch immer zu erwarten.



Die spektrale Empfindlichkeit der drei Scannersensoren (z.B. Chromagraph 299 v. Hell) ist in Abhängigkeit von der Wellenlänge wiedergegeben, in der auch die Farbdichtekurven der drei Filmschichten liegen.

Der Sensor mit Grünfilter erfasst recht gut die Magenta-Schicht und auch der Sensor mit Blaufilter ist noch für die Erfassung der Yellow-Schicht geeignet. Bei dem Sensor mit Rotfilter liegt das Empfindlichkeitsmaximum jedoch ungefähr in der Mitte zwischen den Maxima der optischen Dichte der Filmschichten Magenta und Cyan. Hier müßten die Filter im Rot-Kanal des Scanners ausgetauscht werden, um die spektralen Empfindlichkeiten von Sensor und Filmschicht besser anzugleichen. (Quelle: FISCHER et al. 1987, S.55)

Abb. 3.2: Spektrale Empfindlichkeit des Colorscanners im Vergleich zu den Farbdichtekurven der drei Filmschichten. Quelle: FISCHER & v. KIENLIN 1987, S. 55

Dieser Umstand ist in der Fachliteratur vielfach diskutiert worden, jedoch zeigen Untersuchungen, daß digitalisierte Luftbilder in ähnlich ausgerichteten Arbeiten gute bis sehr gute Analyseergebnisse erzielt haben. Genauere Informationen und detailliertere Diskussionen zu dem Themenkomplex finden sich unter anderem bei FISCHER & v. KIENLIN 1987, S. 50 ff., EVERITT et al. 1987, S. 1255 ff., TRINDER 1987, S. 315 ff., SNOOK et al. 1987, S. 531 ff., BECKER et al. 1988, S. 743 ff., HÄME & RANTASUO 1988, S. 1735 ff., HOOD et al. 1989, S. 1323 ff., MURTHA & WIART 1989, S. 83 ff., HERMAN et al. 1994, S. 1007 ff., BAKER et al. 1995, S. 313 ff., POPE et al. 1996, S. 1387 ff., KÖLBL & BACH 1996, S. 687 ff., HÖHLE 1996, S. 1189 ff., LIGHT 1996, S. 285 ff., DUHAIME et al. 1997, S. 1295 ff., LUMAN et al. 1997, S. 1171 ff., PETRIE 1997, S. 121 ff., EHLERS & MÖLLER 1997, S. 19 ff., HOLOPAINEN & WANG 1998, S. 677 ff. und GRAHAM 1998, S. 105 ff.

Die skizzierten Einflußgrößen erschweren das Mosaikieren der einzelnen Luftbilddatensätze zum Teil erheblich; da sie jedoch nicht Untersuchungsgegenstand der vorliegenden Arbeit sind, wird eine Diskussion zu diesem Themenbereich nicht weiter vertieft.

Die einzelnen Luftbilder (Nrn. 664-672, 714-722, 3934, 3938, 3942, 3946) werden mit dem Scanner „Scanmaster 4500“ der Firma Howtek eingescannt (Produktbeschreibung: Anhang A, Tab. A.17). Als Voreinstellungen werden 300 dpi Auflösung und 24 Bit Farbtiefe gewählt.

Die Auflösung von 300 dpi ist für viele Anwendungen ausreichend und reduziert den Umfang der Datensätze auf ein „handlebares“ Maß, auch wenn die Detailerkennbarkeit dadurch deutlich reduziert wird (vgl. hierzu LUMAN et al. 1997, S. 1171 ff.; TRINDER 1987, S. 315 ff.). Aufgrund der Fragestellung dieser Studie ist eine Bodenauflösung von 0,4 m (CIR-Luftbilder) bzw. 1,0 m (Colorluftbilder) ausreichend.

Zu b):

Die Geocodierung der einzelnen digitalen Luftbilder als Vorbereitung zur Mosaikierung ist sehr aufwendig, da keine digitalen Referenzdaten mit entsprechender Genauigkeit, wie sie z.B. die DGK 5 aufweist, für den Untersuchungsraum zum Zeitpunkt der Durchführung der Geocodierung vorliegen. Aus diesem Grund wird auf die Digitalisierung von Referenzkoordinatenpunkten in DGK-5-Kartenblättern der Region zurückgegriffen. Da kein ERDAS-Imagine-kompatibles Digitalisierbrett zur Verfügung steht, werden die Punkte mit Hilfe eines ArcView-kompatiblen Digitalisierbretts generiert. Die ASCII-Datensätze werden dann in ERDAS Imagine importiert, so daß Referenzkoordinaten-Dateien vorliegen. Da das Untersuchungsgebiet keine nennenswerten Reliefunterschiede aufweist, wird für die Geocodierung kein DGM (Digitales Geländemodell) benötigt.

Die Geocodierung der Luftbilddaufnahmen erfolgt in zwei Schritten:

1. Geocodierung des einzelnen Luftbildes,
2. Zusammenfügen der einzelnen Luftbilder zu einem Luftbildmosaik.

Zu 1.:

Für die insgesamt 22 Luftbilder werden in sechs DGK-5-Blättern Referenzpunkte digitalisiert. Aufgrund der Tatsache, daß das Gebiet sehr stark land- und forstwirtschaftlich geprägt ist, stehen sehr wenig invariante, zuverlässige Paßpunkte im Gelände zur Verfügung (Details: Kap. 3.2.4). Für die Bilder von 1985 können im Schnitt zehn Paßpunkte pro Bild festgelegt werden, während für die kleinmaßstäbigeren Bilder von 1990 in der Regel 25-30 Punkte identifiziert werden können (siehe auch ALBERTZ et al. 1989, S. 73 ff., 89).

Der gesamte gemittelte quadratische Fehler, „Root Mean Square Error“ (RMS-Fehler), der die Genauigkeit einer Geocodierung widerspiegelt, liegt bei den CIR-Luftbildern zwischen drei und vier Pixeln (1,2-1,6 m Lageungenauigkeit). Für die Colorluftbilder bewegt sich dieser Wert zwischen zwei und drei Pixeln (2-3 m Lageabweichung; siehe hierzu auch ERDAS INC. 1999, S. 348 ff.; BAKER et al. 1995, S. 314 f.; vgl. Kap. 3.2.4).

Als „Resampling“-Methode, also als Transformationsgleichung zur Extrapolation der Grauwerte der Quellpixel in das neue Koordinatengitter, wird die Methode der „Bilinearen Interpolation“ gewählt (vgl. Abb. B.2, Anhang B). Zwar gehen im Rahmen dieser Methode die originalen radiometrischen Informationen verloren, da neue Grauwerte berechnet werden, die Vorteile dieser Methode z.B. gegenüber der des „Nächsten Nachbarn“ überwiegen

jedoch deutlich (vgl. Abb. B.12, Anhang B). Ein Lageversatz von bis zu einem halben Pixel, wie er im Zuge der Methode „Nächster Nachbar“ auftreten kann, wird vermieden (weiterführend hierzu: GÖPFERT 1987, S. 145; KRAUS 1990, S. 424; HÖHLE 1996, S. 1193). Zudem wird das Bild durch die gewählte Methode sehr viel homogener, da die „Treppenburg“, wie sie bei dem Verfahren „Nächster Nachbar“ auftritt, eliminiert wird. Außerdem trägt die gleitende Grauwertbildung dazu bei, daß Objekte und Sinnzusammenhänge besser erfaßt werden können und die Lagegenauigkeit von Objekten ebenfalls erhöht wird (Details: vgl. Kap. 3.2.3). Die Pixelgrößen der geocodierten Ergebnisbilder werden auf die nominelle Größe, die im Zuge des Scanverfahrens festgelegt wurde (0,4 bzw. 1 m Pixelkantenlänge), angepaßt, da einheitliche Pixelgrößen für die folgende Mosaikierung unerläßlich sind.

Zu 2.:

Der Mosaikierungsprozeß ist vor allem aufgrund der stark schwankenden radiometrischen Qualitäten der digitalen Luftbilder äußerst aufwendig (s.o.). Abbildung 3.3 verdeutlicht den Ablauf der einzelnen Arbeitsschritte. Im folgenden wird der Prozeß der Geocodierung und der anschließenden Mosaikierung exemplarisch für alle bearbeiteten Luftbilder dargelegt.

Die Geocodierung und Mosaikierung eines Luftbildes erfolgt in mehreren Schritten:

1. Geocodierung des einzelnen Bildes auf Gauß-Krüger-Koordinaten zur Vorbereitung der Mosaikierung. Da die potentiellen Überlappungsbereiche in den Randbereichen des Bildes liegen (sukzessive Referenzierung auf benachbarte Bilder wird folgen), werden die Referenzpunkte für diesen Arbeitsschritt vornehmlich im Bildzentrum festgelegt (oberer Bereich, da untere Bildhälfte zur Bildpaarmosaikierung dient; Abb. 3.4).
2. Georeferenzierung eines Luftbildes auf ein Referenzluftbild, wobei die Lage der Punkte durch den Überlappungsbereich der beiden Bilder bestimmt wird. Hierbei wird die bestehende Geocodierung im Ausgangsbild außerhalb des Überlappungsbereichs über randlich liegende Referenzpunkte „festgehalten“ (Abb. 3.5). Danach erfolgt die Mosaikierung der beiden Luftbilder (Abb. 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9).
3. Georeferenzierung des dadurch entstandenen Bildpaares auf ein Referenzbildpaar bzw. Referenz(Teil-)mosaik. Auch hierbei wird die Lage der Referenzpunkte durch den Überlappungsbereich bestimmt (Abb. 3.10). Hier wird das neue Bildpaar an das bestehende Teilmosaik in dem Überlappungsbereich der Referenzpunkte (Teilmosaik und neues Bild, zum Teil repräsentiert durch das schwarze Feld) angepaßt. Danach erfolgt die Mosaikierung der beiden Teilmosaiken (Abb. 3.11, 3.12).

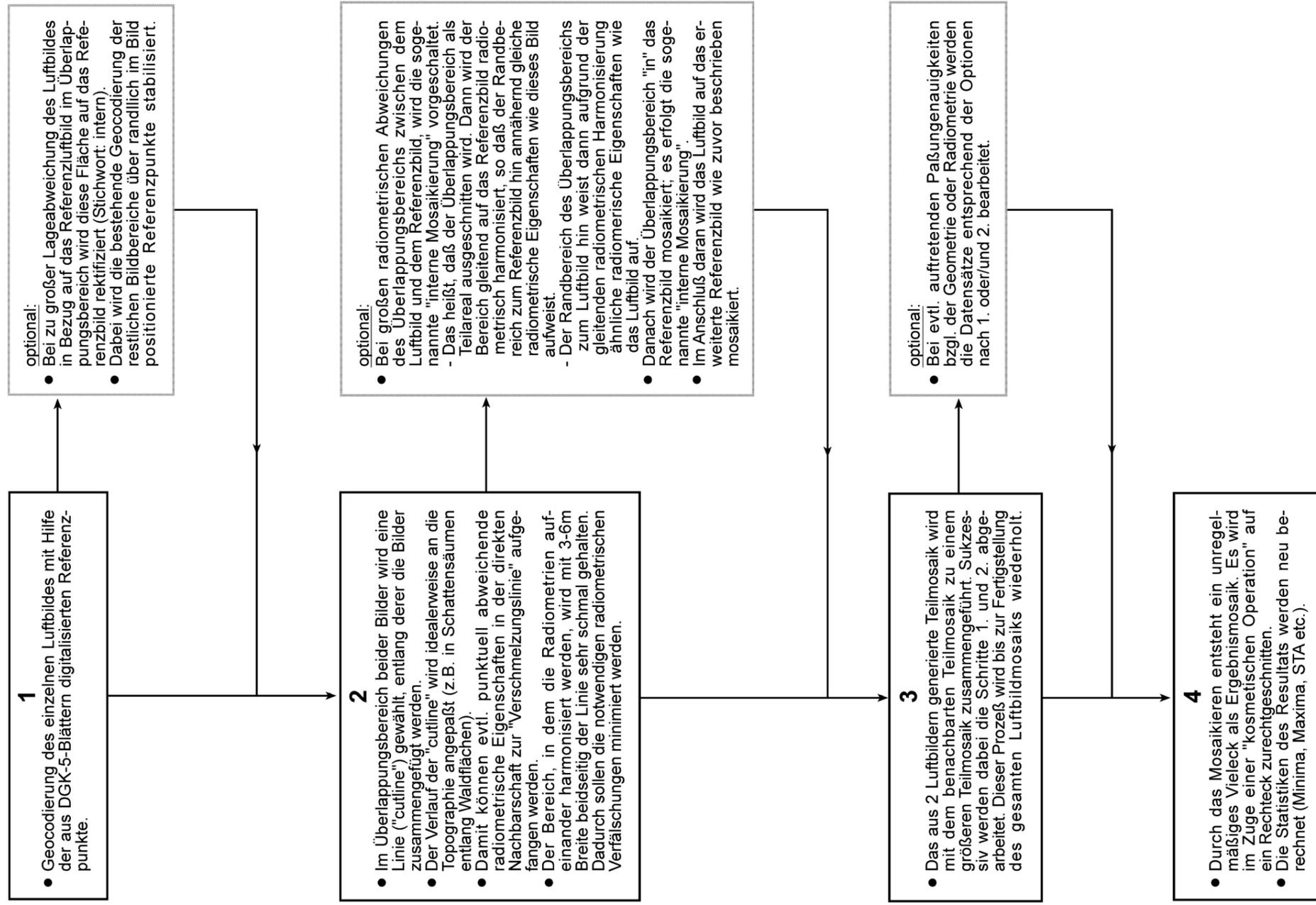


Abb. 3.3: Arbeitsablauf der Mosaikierung der Luftbilder

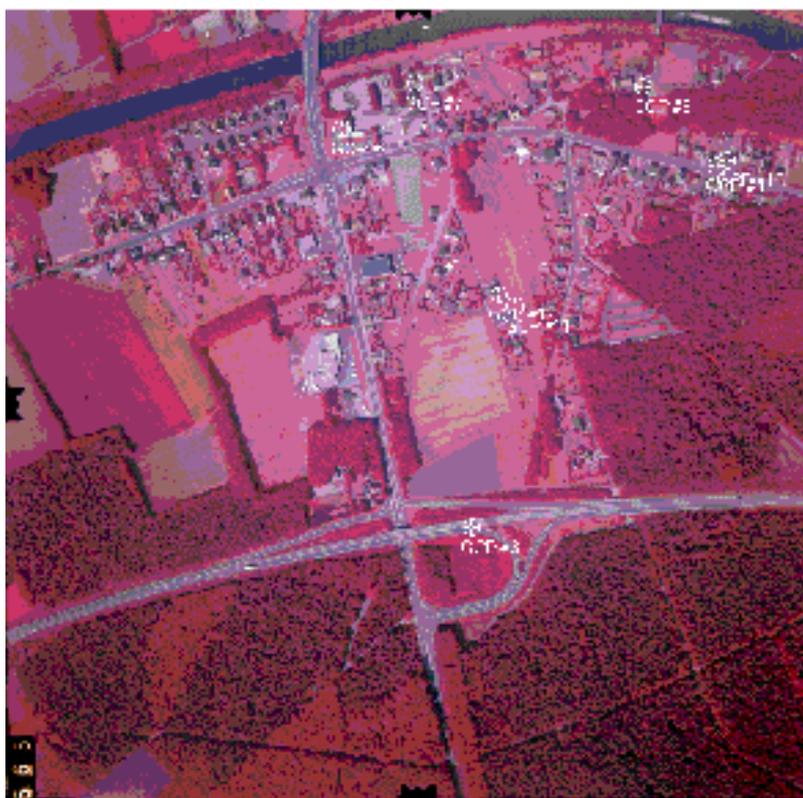


Abb. 3.4: Digitalisiertes CIR-Luftbild Nr. 666: Referenzpunkte (screenshot)



Abb. 3.5: Digitalisiertes CIR-Luftbild Nr. 666, geocodiert auf das Gauß-Krüger-Koordinatensystem: Paßpunktlage für die Referenzierung auf das südlich gelegene Bild Nr. 716 sowie Punkte, die die bestehende Geocodierung außerhalb des Überlappungsbereichs „festhalten“ (screenshot)

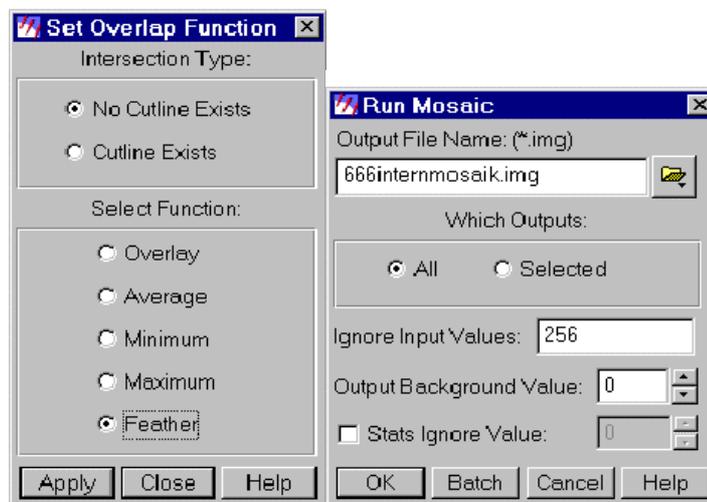
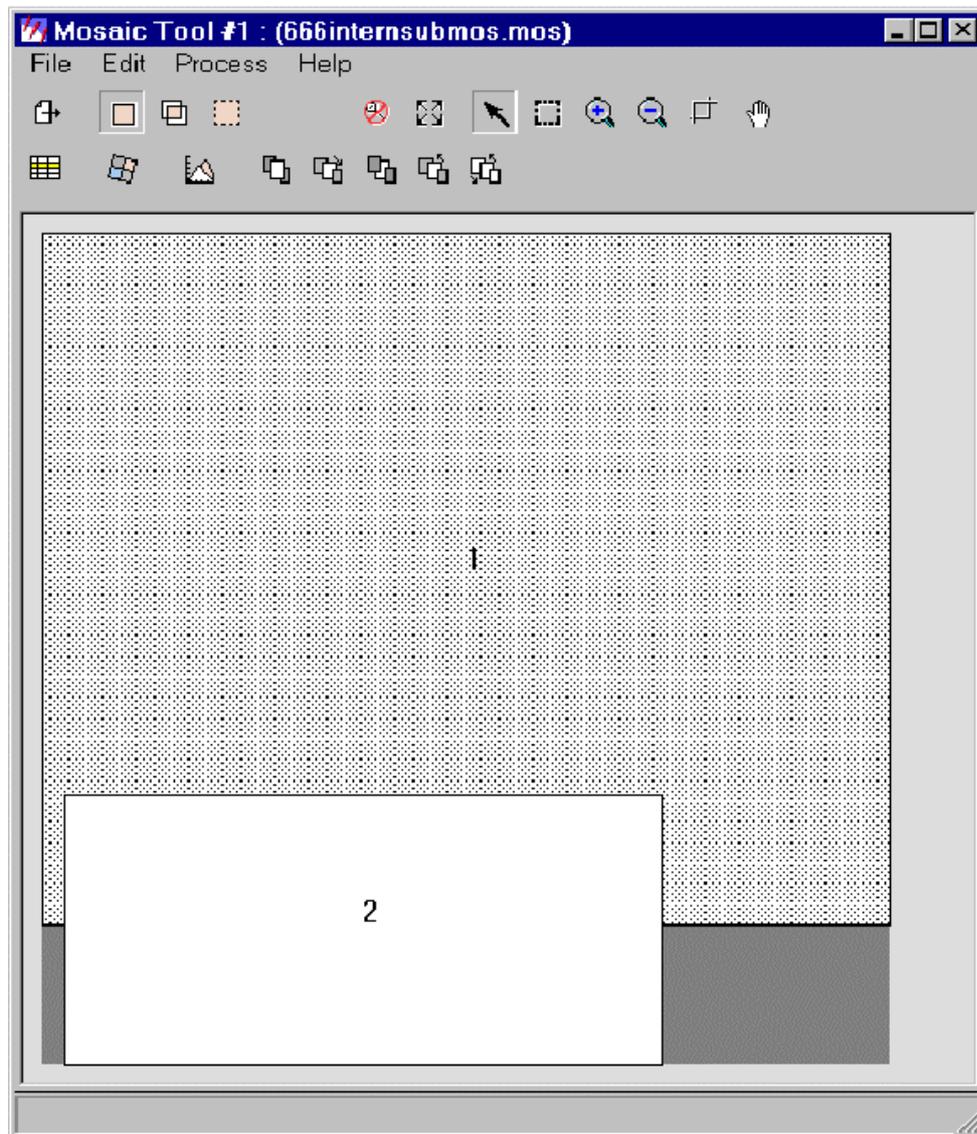


Abb. 3.6: 1. Schritt der Mosaikierung von CIR-Bildnr. 666 zu 716: Herstellung eines internen Mosaiks, wobei Mosaik Nr. 2 ein Mosaik des Überlappungsbereichs zwischen Nr. 666 und Nr. 716 ist, das radiometrisch auf das Bild Nr. 716 angepaßt ist (overlap function: feather; screenshot)

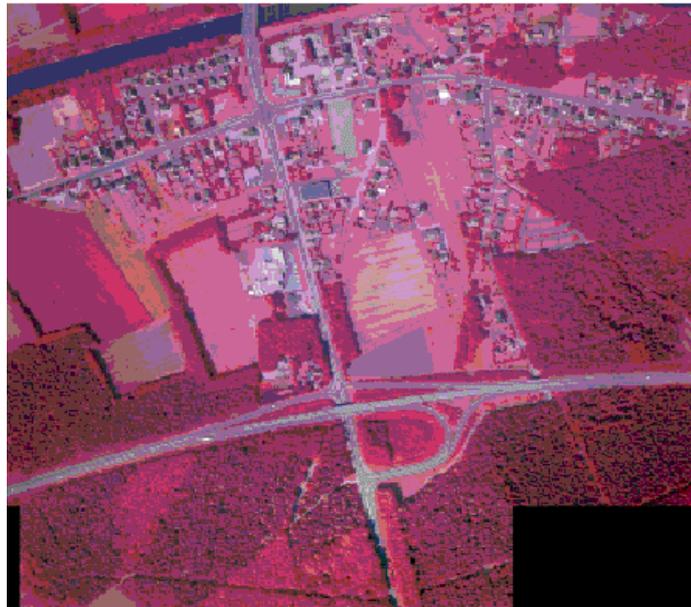


Abb. 3.7: Ergebnis der internen Mosaikierung (screenshot)

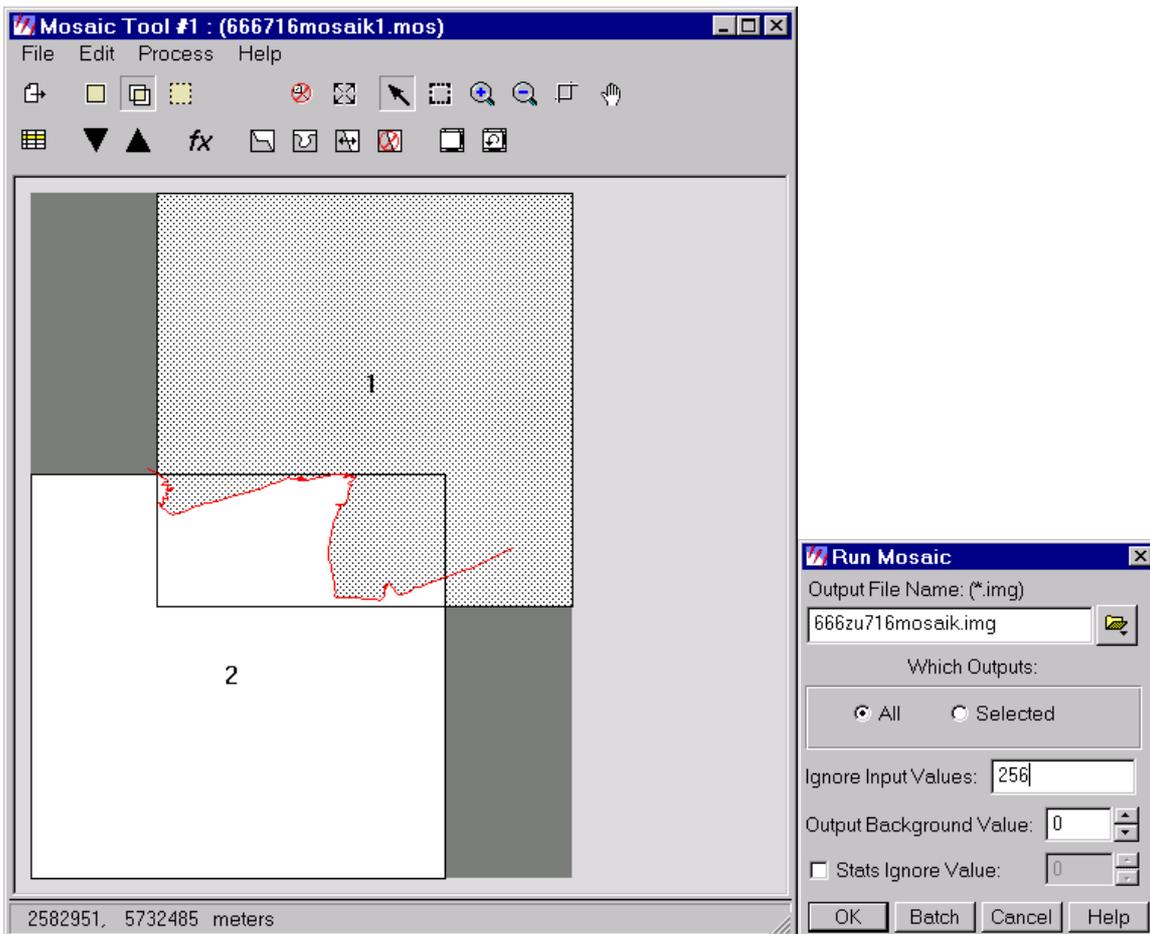


Abb. 3.8: 2. Schritt: Mosaikierung der Bilder Nrn. 666 und 716 (screenshots)



Abb. 3.9: Ergebnis der Mosaikierung der Bilder Nrn. 666 und 716 (screenshot)

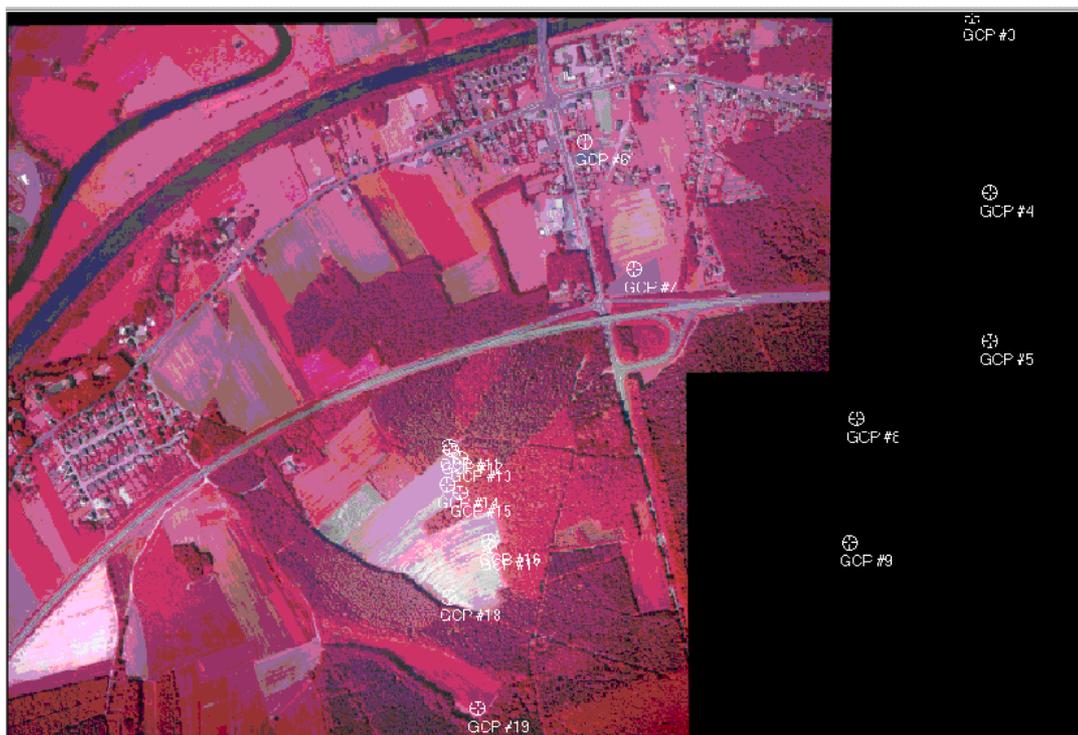


Abb. 3.10: Digitalisierte CIR-Luftbilder Nrn. 664-666, 714-716 im Teilmosaik. Dargestellt sind zudem die Paßpunkte für die Referenzierung eines weiteren Bildpaares als Vorbereitung der darauffolgenden Mosaikierung (rechter Bildbereich; screenshot)

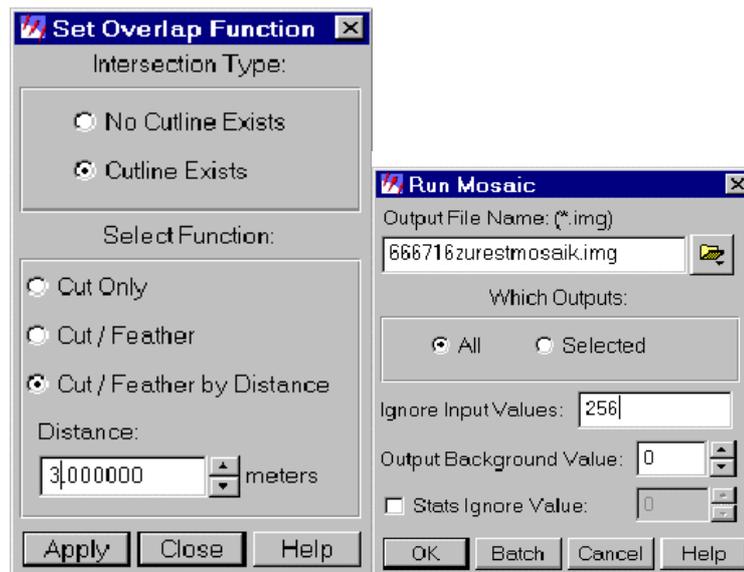
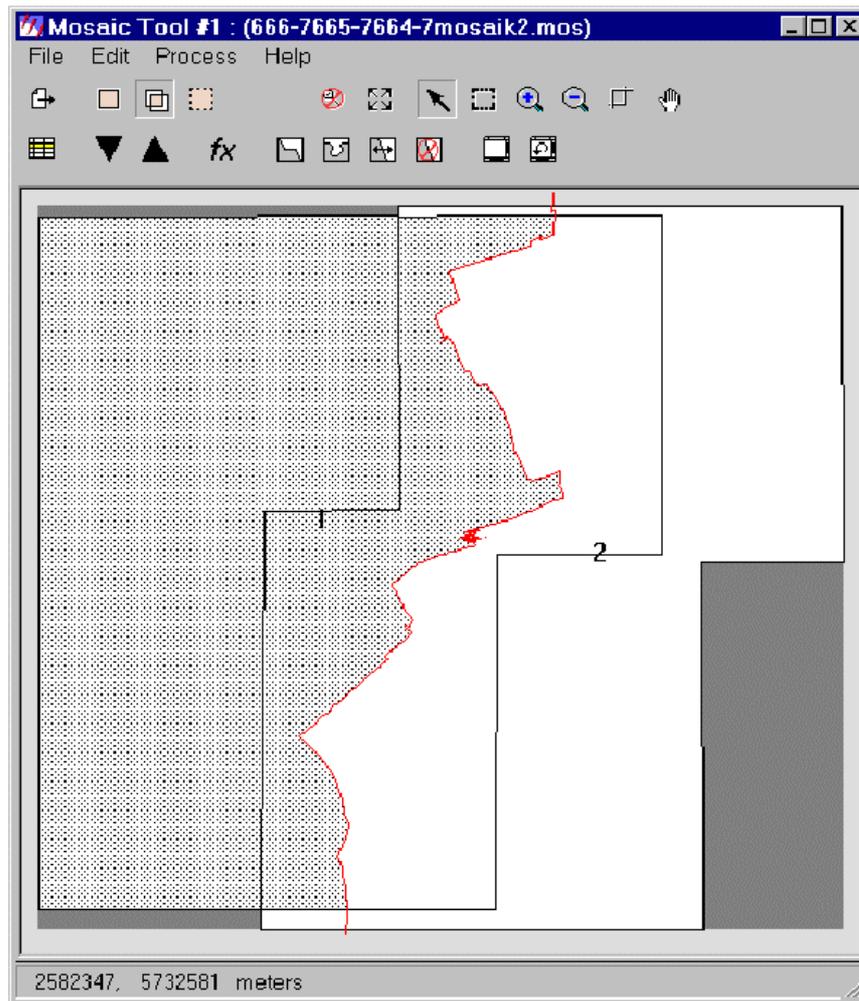


Abb. 3.11: Mosaikierung des Teilmosaiks der Bilder Nrn. 666 und 716 mit dem bisherigen Teilmosaik aus den Bildern Nrn. 664, 665, 714, 715 (screenshots)



Abb. 3.12: Ergebnis der Mosaikierung des Teilmosaiks 666-716 mit dem früheren Teilmosaik 664, 665, 714, 715 (screenshot)

Dieses Verfahren wird auf jedes einzelne Luftbild der beiden Datensätze von 1985 und 1990 angewendet. Da jeweils benachbarte Luftbilder in den beiden Datensätzen in bezug auf die Geometrie und die radiometrischen Eigenschaften unterschiedliche Paßgenauigkeiten aufweisen (Randabfall etc.), werden die in den vorangegangenen Abbildungen verdeutlichten Arbeitsschritte individuell pro Teilmosaik ausgeführt. Der Arbeitsaufwand schwankt zwischen den einzelnen Mosaikierungsschritten erheblich. Dabei erweist sich vor allem die Anpassung der radiometrischen Eigenschaften benachbarter Bilder als sehr komplex. Zur Harmonisierung der Radiometrie in den Überlappungsbereichen müssen pro Bildpaar identische Ausschnitte erstellt werden. Diese werden zunächst mosaikiert, wobei mit der Funktion „feather“ eine Harmonisierung der Radiometrie für den gesamten Überlappungsbereich erreicht wird. In einem weiteren Schritt wird dieses „Submosaik“ auf eines der betroffenen Bilder „zurückmosaikiert“, so daß eines der betroffenen Bilder im Überlappungsbereich eine harmonisierte Radiometrie aufweist („interne Mosaikierung“; vgl. Abb. 3.6, 3.7). Für die danach folgende endgültige Mosaikierung der beiden Bilder wird entlang der Mosaikergrenzlinie ein sehr enger Verlaufsgebiet (3-6 m) gewählt, in dem wiederum eine Anpassung der radiometrischen Eigenschaften durchgeführt wird. Der Grund für die Wahl des schmalen Verlaufsgebiet liegt zum einen in dem Bestreben, die radiometrischen Eigenschaften nicht mehr als notwendig zu verändern. Zum anderen können damit aber auch geometrische Paßgenauigkeiten, z.B. im Abstand von 10 m von der „cutline“ (Grenzlinie, an der das Mosaik zusammengefügt wird), eliminiert werden. Nur mit großem Erfahrungsschatz kann der Verlauf der „cutline“ in Abhängigkeit von der Topographie und der geometrischen Paßgenauigkeit der Bilder optimal gewählt werden (dies wird bestätigt durch AFEK & BRAND 1998, S. 115 f.; HÖHLE 1996, S. 1189 f.; HOOD et al. 1989, S. 1323 ff.).

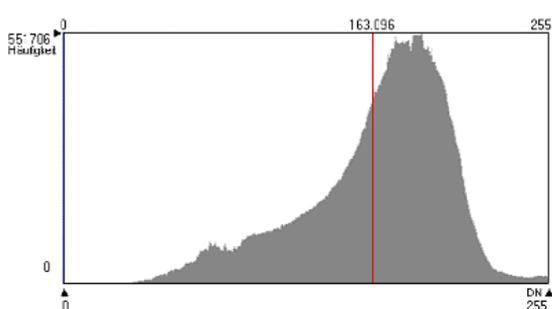
Die Endergebnisse der Mosaikierungen weisen trotz geschickter Wahl der Mosaikierungsgrenzen, um größere radiometrische Differenzen benachbarter Bilder zu eliminieren, deutliche Wechsel in der Radiometrie/farblichen Wiedergabe innerhalb eines Objekttyps auf. Ebenso sind Beleuchtungsunterschiede in einem Bild, wie sie z.B. durch das Phänomen des Randabfalls oder das Problem „Mitlicht-, Gegenlichtbereich“ auftreten, deutlich sichtbar. Dies kann sich zusätzlich zur unterschiedlichen Qualität benachbarter Bilder negativ auf die Isolation der Spektralsignatur einer Objektgruppe auswirken, da die spektralen Eigenschaften einer Objektgruppe je nach Lage zur Beleuchtungsquelle (Mitlicht-, Gegenlichtbereich) wie auch zum Bildmittelpunkt (Randabfall) differieren (s.o.). Folglich sind homogene Spektralsignaturen ausgewählter Objektgruppen nur schwer zu isolieren (z.B. Klassifizierung von Wasserflächen, vgl. Kap. 4.2, 5.1). Im folgenden werden die beiden Luftbildmosaik charakterisiert (vgl. Tab. 3.1).

Tab. 3.1: Charakterisierung der digitalen Luftbilddatensätze

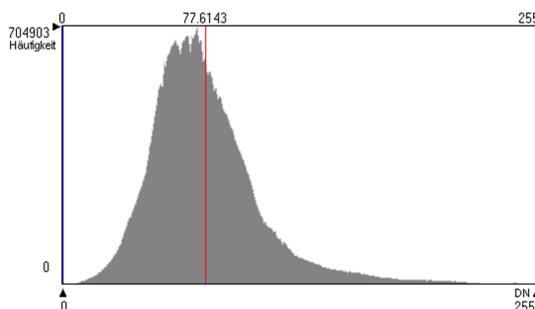
	Scanauflösung	Bildgröße (MB)	Endprodukte (MB)	GK-Eckkoordinaten	Bodenauflösung
CIR-Bilder v. 25.07.85	300 dpi	ca. 22	ca. 130	$^{25}80772, ^{57}33397$ $^{25}84893, ^{57}31816$	0,4 m
Color-Bilder v. 05.05.90	300 dpi	ca. 22	ca. 44	$^{25}80730, ^{57}34164$ $^{25}86015, ^{57}31577$	1,0 m

Die radiometrischen Eigenschaften sind den folgenden Abbildungen (3.13, 3.14) und Tabellen (3.2, 3.3) zu entnehmen.

Kanal 1 (NIR: Nahes Infrarot):



Kanal 2 (Rot):



Kanal 3 (Grün):

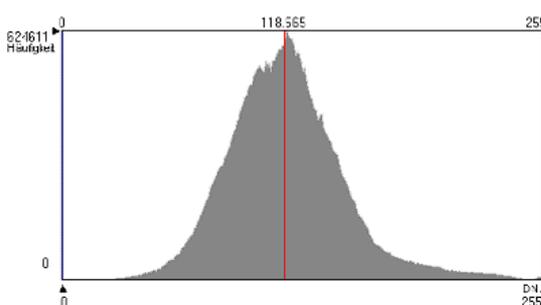


Abb. 3.13: Histogramme des digitalen CIR-Luftbildmosaiks. Quelle: ERDAS Imagine: Image Info, verändert

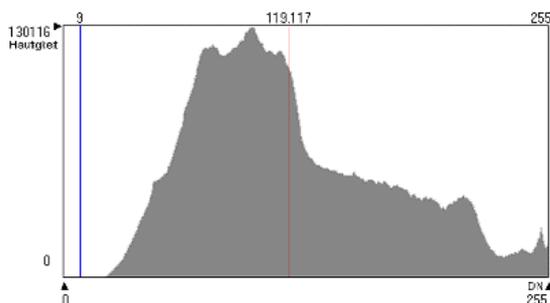
Tab. 3.2: Luftbildmosaik vom 25.07.1985: radiometrische Eigenschaften

Kanal	Min.	Max.	Konzentrationsbereich	Histogrammkurve, rad. Eigensch.	STA	Arithm. Mittel
1	0	255	36-255	Gipfel:76, 84, 174, 188 hell, negativ schief	39,119	163,096
2	0	255	6-200	Gipfel: 60, 67, 74, eher dunkel u. homogen, positiv schief	32,378	77,614
3	0	255	28-255	Gipfel: 104, 107, 118, 137, DN's im mittleren Feld, fast normalverteilt	32,625	118,565

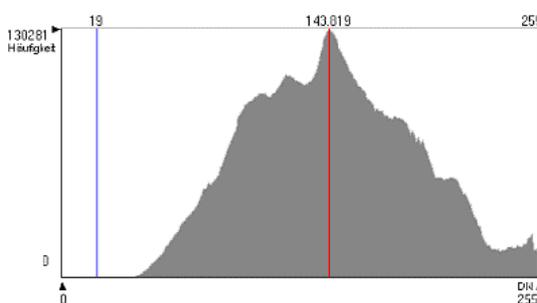
(Min. = Minimum, Max. = Maximum, rad. Eigensch. = radiometrische Eigenschaften, STA = Standardabweichung, Arithm. Mittel = arithmetisches Mittel, DN = Digital Number)

Sowohl aus den Histogrammen als auch aus den statistischen Maßzahlen wird ersichtlich, daß der Datensatz in allen Kanälen breit streut; dies wird auch durch die relativ großen Standardabweichungen (STA) deutlich. Kanal 1 und Kanal 3 sind zudem als relativ hell anzusprechen, während Kanal 2 in der Grauwertverteilung eher als dunkel zu charakterisieren ist. Zwar sind Gipfel vorhanden, die auf relativ homogenes Spektralverhalten einzelner Objektgruppen hindeuten, doch sind sie nicht gut zu isolieren (vgl. atmosphärenkorrigierte Satellitenbilddatensätze Kap. 3.2.1, 3.2.2).

Kanal 1 (Rot):



Kanal 2 (Grün):



Kanal 3 (Blau):

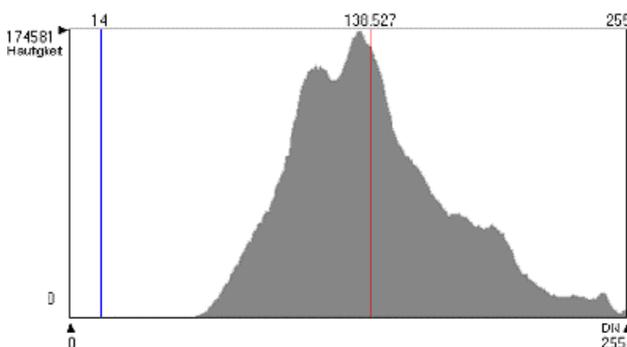


Abb. 3.14: Histogramme des digitalen Color-Luftbildmosaiks. Quelle. ERDAS Imagine: Image Info, verändert

Tab. 3.3: Luftbildmosaik vom 05.05.1990: radiometrische Eigenschaften

Kanal	Min.	Max.	Konzentrationsbereich	Histogrammkurve, rad. Eigensch.	STA	Arithm. Mittel
1	9	255	21-255	Gipfel:78, 98, 113, 210, 251, DN's im mittleren Feld, leicht positiv schief	51,197	119,117
2	19	255	39-255	Gipfel: 119, 142, 177, 251, hell, unruhiger Verlauf mit mehreren Schultern	32,378	143,819
3	14	255	56-255	Gipfel: 132, 193, 244, eher hell, leicht positiv schief	37,218	138,527

(Min. = Minimum, Max. = Maximum, rad. Eigensch. = radiometrische Eigenschaften, STA = Standardabweichung, Arithm. Mittel = arithmetisches Mittel, DN = Digital Number)

Ähnlich wie im ersten Luftbildmosaik streuen die Grauwerte auch für dieses Mosaik recht breit (vgl. STA). Allerdings sind in diesem Mosaik mehr Gipfel in den einzelnen Kanälen vorhanden, die zudem sehr viel besser zu isolieren sind.

Für weitere Vergleichsanalysen ist es außerdem unerlässlich, daß das Mosaik von 1990 auf eine Pixelgröße bzw. Bodenauflösung von 0,4 m heruntergerechnet wird, da durch die Pixelvervielfachung die Detailerkennbarkeit sowie die Lagegenauigkeit von Objekten verbessert und die Vergleichbarkeit der Luftbilddatensätze gewährleistet wird (Details: vgl. Kap. 3.2.3, 3.2.4). Die Ortstreue von Objekten ist gerade für Zeitreihenanalysen im Zuge von Umweltmonitoringverfahren unabdingbar, da nur hierüber aussagekräftige Resultate erzielt werden können (vgl. Kap. 3.2.3, 3.2.4). Hierzu wird der Ausschnitt des Luftbildmosaiks von 1990 auf den kleineren Ausschnitt des Mosaiks von 1985 eingepaßt.

Diese beiden Datensätze liegen den folgenden Untersuchungen zugrunde. Für die Bildschirmarbeit wird auf eine radiometrische Manipulation der Daten (z.B. Kontrastverstärkung über das Verfahren der zweifachen STA) verzichtet.

## 3.2 Vorprozessierung der Satellitenbilddaten

Eine Geocodierung der benutzten Satellitenbilddaten ist aufgrund der Fragestellung der Studie unabdingbar (vgl. Kap. 1.4). Um die vorliegenden Datensätze verschiedener Aufnahmezeitpunkte bzw. verschiedener Sensoren im Rahmen des Umweltmonitorings vergleichend analysieren zu können, müssen die Datensätze geocodiert vorliegen. Zudem zeigen Untersuchungen zur radiometrischen Qualität der Daten, daß auch eine Korrektur der Einflüsse der Atmosphäre sowie zusätzliche weitere Verfahren zur Verbesserung der radiometrischen Eigenschaften der Daten erforderlich sind (vgl. unten).

### 3.2.1 Vorprozessierung: Atmosphärenkorrektur - theoretischer Rahmen

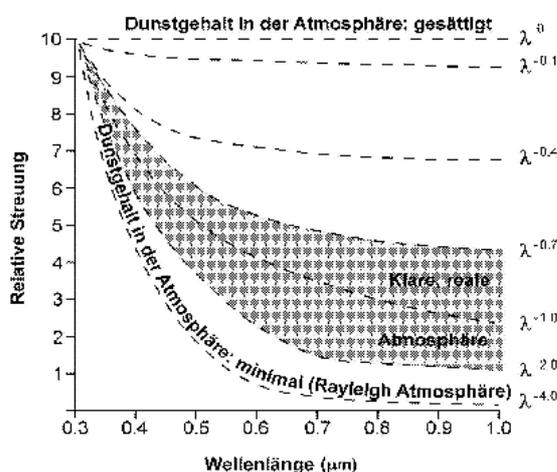
Die Reduzierung von Einflüssen durch Atmosphärenbedingungen, die sich z.B. durch verschiedene Aerosolgehalte, Dunst- oder Wolkenfelder ergeben, wird in der Literatur dringend empfohlen (vgl. unten). Idealerweise wird dabei eine Umwandlung der Digital Numbers (DN) der Pixel in absolute Reflexionswerte (Prozentwerte) angestrebt. Die Begründungen für diese Forderung sind vielfältig und lassen sich in drei Aspekten zusammenfassen:

1. Nur mit einer Atmosphärenkorrektur kann man sicher sein, die tatsächliche Reflexion von Zielobjekten zu erhalten und diese für die weiteren Arbeiten zu verwenden, so daß keine Verfälschungen der Daten oder sogar Artefakte auftreten. Das bedeutet, daß letztlich auch für monotemporale Satellitenbildanalysen der Einfluß der Atmosphäre korrigiert werden sollte.
2. Will man vergleichende Untersuchungen auf der Basis von Satellitenbilddaten, Feld- (z.B. Spektrometermessungen) oder/und Atmosphärenmessungen durchführen, so ist eine Atmosphärenkorrektur unerlässlich, da nur dadurch die Ergebnisse der verschiedenen Messungen im Feld, in der Atmosphäre und in den Satellitenbilddaten vergleichbar werden.
3. Im Rahmen von Zeitreihenanalysen ist eine Atmosphärenkorrektur für die einzelnen Satellitenbilddatenschnitte ebenfalls unverzichtbar, da nahezu zwangsläufig unterschiedliche Atmosphärenzustände zwischen den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten auftreten. Diese Umstände können die Reflexionswerte von Objekten derart verfälschen, daß z.B. die Objektgruppe „Straßenflächen“ sehr verschiedene DNs in den jeweiligen Datensätzen aufweist. Für vergleichende Analysen sind jedoch die tatsächlichen Reflexionswerte, die idealerweise als absolute Reflexionswerte wiedergegeben werden (Prozentwerte), unerlässlich. Nur dadurch können verlässliche Ergebnisse erzielt werden. Die absoluten Reflexionswerte sind allerdings in der Regel nur über eine Atmosphärenkorrektur generierbar. Darüber hinaus bietet sich die Chance, verschiedene Sensordaten bei ähnlicher geometrischer und spektraler Auflösung im Rahmen einer Zeitreihenanalyse kombiniert zu analysieren, statt nur auf einen Sensortyp zurückzugreifen. Eine vergleichende Untersuchung allein auf Basis der DNs der verschiedenen Sensoren würde in diesem Fall keine verlässlichen Resultate ergeben (weiterführend hierzu: MATHER 1999, S. 88; RICHTER 1996, S. 1201 f.; CRACKNELL & HAYES 1993, S. 116 ff.; HILL & STURM 1991, S. 1472).

Der Einfluß der Atmosphäre auf die radiometrischen Bildeigenschaften läßt sich in verschiedene Komponenten gliedern:

- Die additiven und multiplikativen Effekte durch a) atmosphärische (Streu-)Strahlung bzw. Luftlicht in Abhängigkeit vom Aerosolgehalt der Atmosphäre (Mie-Streuung); alternativ wirkt die sogenannte Rayleigh-Atmosphäre (vgl. CRACKNELL 1997, S. 176 f.); b) je nach Zustand der Atmosphäre: diffuse oder direkte Sonneneinstrahlung; c) durch gestreute Reflexion aus der Umgebung eines Zielobjektes wird dessen originäre Reflexion verändert (Überstrahlungseffekt).
- Die Reflexion eines Zielobjektes wird durch die Absorption und Transmission von auf dem Zielobjekt ankommender und abgegebener Strahlung verändert.

Dabei ist zu beachten, daß die genannten Größen in der Regel interaktiv wirken, wobei der Einfluß - vor allem der des Luftlichts - mit zunehmender Wellenlänge der Kanäle eines Sensors abnimmt (vgl. Abb. 3.15; siehe auch MATHER 1999, S. 15 f.; KAUFMAN 1985, S. 26 f.; HILDEBRANDT 1996, S. 490 f.; CHAVEZ 1996, S. 1027).



Relative Streuung als eine Funktion der Wellenlänge  $\lambda$   
für verschiedene Dunstgehalte der Atmosphäre  
(verändert nach Colwell 1983, S. 246)

Abb. 3.15: Modell zum abnehmenden Einfluß des Luftlichts in Abhängigkeit von der Wellenlänge.

Quelle: MATHER 1999, S. 17

Die folgenden Algorithmen veranschaulichen die oben genannten Zusammenhänge:

$$L_s = H_{tot} \rho T + L_p$$

- $L_s$  = gesamte vom Sensor aufgezeichnete Strahlung  
 $H_{tot}$  = gesamte abwärts gerichtete Strahlung in einem Wellenlängenbereich  
 $\rho$  = Reflexion des Zielobjektes  
 $T$  = atmosphärische Transmission  
 $L_p$  = atmosphärische Strahlung bzw. Luftlicht

oder

$$I_{(r)} = I_M + I_\beta + I_0$$

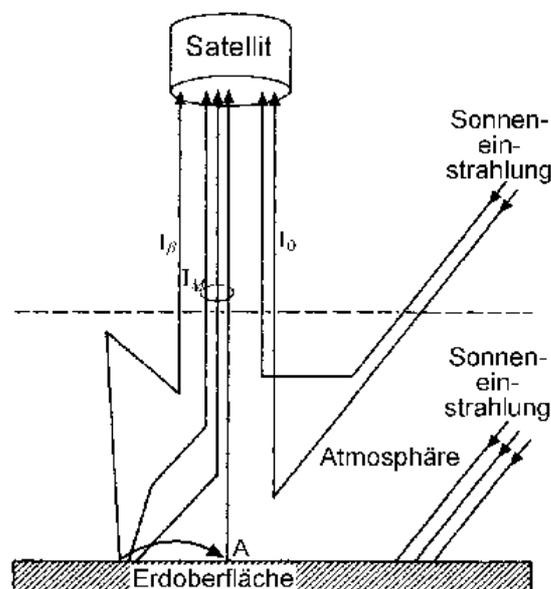
$I_{(r)}$  = Rückstrahlung des Zielobjektes außerhalb der Atmosphäre

$I_M$  = Strahlung vom Zielobjekt, die durch Überstrahlungseffekte und durch Streuung anderer Strahlung auf das Zielobjekt verändert/vermehrt wird (additive Strahlung)

$I_{\beta}$  = ungerichtete und zufällige Streustrahlung von der Erdoberfläche, zum Teil in  $I_M$  impliziert

$I_0$  = atmosphärische Streustrahlung, die nicht von der Oberfläche reflektiert wird bzw. Luftlicht

(vgl. Abb. 3.16; siehe hierzu auch MATHER 1999, S. 88; KAUFMAN 1985, S. 23; mathematische Ableitungen: ORTHABER 1999, S. 53).



Schema des Atmosphäreneinflusses auf die im Sensor aufgezeichnete Strahlung. Die Sonneneinstrahlung wird in drei Komponenten zerlegt:  
 $I_0$  : Luftlicht  
 $I_{\beta}$  : Diffuse Beleuchtung, abgelenkte Strahlung und Reflexion/Emission  
 $I_M$  : direkte Reflexion/Emission plus Reflexion/Emission durch Nachbarschaftseffekte  
 Zielobjekt ist A

Abb. 3.16: Vereinfachtes Modell der atmosphärischen Effekte auf die Reflexion eines Zielobjektes.

Quelle: KAUFMAN 1985, S. 23, verändert

Für die Atmosphärenkorrektur werden im allgemeinen zwei Verfahrensarten unterschieden:

1. Einfache Näherungsverfahren,
2. Verfahren, die mit komplexen Strahlungsübertragungs- und Aerosolmodellen arbeiten.

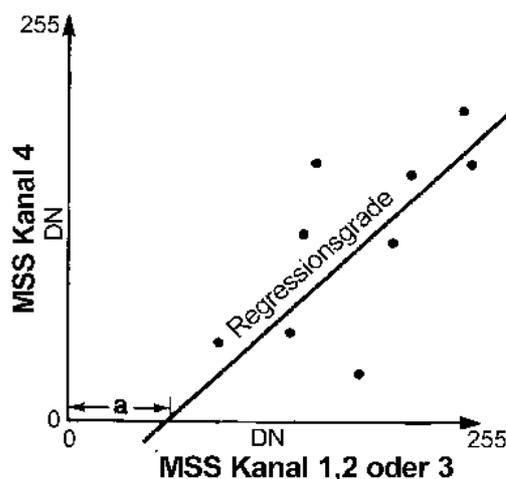
Um die Parameter der Algorithmen zu kalibrieren, werden idealerweise zeitgleich in-situ-, feld- bzw. flugzeuggestützte und satellitengestützte Messungen zum Zustand der Atmosphäre durchgeführt. Da dieser Aufwand in der Regel nicht praktikabel und finanzierbar ist, bieten sich Korrekturverfahren zur Reduzierung des Atmosphäreneinflusses an, die sich auf Sensordaten und Simulationsmodelle stützen (vgl. auch CRACKNELL 1997, S. 188; CHAVEZ 1996, S. 1026 f.). Die einfachen Verfahren basieren ausschließlich auf Sensordaten, während die komplexeren Methoden auch Simulationsmodelle hinzuziehen.

### 1. Einfache Näherungsverfahren:

Unterschieden werden können die „Histogramm-Minimum-Methode“ bzw. „Methode der Subtraktion dunkler Objekte“, auch „dark-object-subtraction-method“ (DOS-Methode) genannt, und die „Regressionsmethode“. Bei der **DOS-Methode** werden kanalweise die Histogramme berechnet. Dann wird der Versatz des jeweiligen Histogramms auf der x-Achse vom Nullpunkt analysiert. Im allgemeinen findet sich in einem Untersuchungsgebiet für jeden Kanal ein Objekt mit sehr niedrigen DN's, die nahe dem Nullpunkt liegen sollten (z.B. Wasserflächen im NIR). Bedingt durch Atmosphäreneinflüsse weisen diese Objekte jedoch höhere DN's auf. Pro Kanal wird nun der Versatz subtrahiert, so daß die Histogramme nach links gegen den Nullpunkt verschoben werden. Dadurch kann eine Näherung an die reale Reflexion der Objekte erreicht werden. Der Vorteil der DOS-Methode liegt darin, daß sie unabhängig von weiteren Informationsquellen, allein auf Bilddaten basierend, einfach und schnell durchzuführen ist. Allerdings ist sie durch diverse Nachteile stark fehlerbehaftet:

- Der Luftlichteinfluß, der durch Subtraktion eliminiert werden soll, nimmt mit zunehmender Wellenlänge ab. Folglich sind Versätze der Histogramme in höheren Wellenlängenbereichen wie NIR oder MIR (Mittleres Infrarot) nicht mehr ausschließlich durch den Einfluß von Luftlicht bedingt. In diesen Kanälen kann das Verfahren zu Verfälschungen/Überkorrekturen führen.
- Die atmosphärische Transmission mit multiplikativer Fehlerwirkung auf die Streuung und Absorption bleibt hierbei unberücksichtigt.
- Die Genauigkeit der Korrektur nimmt bei Reflexionswerten  $\geq 15\%$  rapide ab, da sich der Einfluß des Dunstgehaltes in der Atmosphäre nicht linear zu den Reflexionswerten verhält. Damit wird die Methode unbrauchbar (MATHER 1999, S. 89; CHAVEZ 1996, S. 1027).

Die **Regressionsmethode** arbeitet nach einem ähnlichen Prinzip wie die DOS-Methode. Vorausgesetzt wird, daß die DN-Verteilung der Kanäle einer multispektralen Satellitenbildszene eng mit der des Kanals im NIR korreliert. Das Augenmerk liegt auch hier auf den jeweils dunkelsten DN's je Kanal. In einem zweidimensionalen Merkmalsraum werden die DN's des NIR-Kanals gegen die der anderen Kanäle abgetragen; aus deren Verteilung wird eine Regressionsgerade berechnet, die die x-Achse beim resultierenden Achsenabschnitt schneidet. Der („gemittelte“) Achsenabschnitt wird im nächsten Rechenschritt von den Kanälen subtrahiert (vgl. Abb. 3.17; siehe auch MATHER 1999, S. 89; HILDEBRANDT 1996, S. 490; SWITZER et al. 1981, S. 1469 ff., weiterführend zu Landsat MSS: Tab. A.1, Anhang A). Die Vor- und Nachteile sind denen der DOS-Methode ähnlich.



Regressionsgerade zur Berechnung des Luftlichts, das proportional zum Achsenabschnitt *a* ist. Die Punkte repräsentieren DNs aus dunklen Bildbereichen in den Kanälen 1, 2, 3 und 4 des Sensors Landsat-MSS.

Abb. 3.17: Schema der Regressionsmethode zur Atmosphärenkorrektur. Quelle: MATHER 1999, S. 89, verändert

## 2. Komplexe Näherungsverfahren:

Beispielhaft für die Fülle an Verfahren und Algorithmen, die sich in der Mehrzahl der Fälle ähneln, wird im folgenden eine Auswahl an komplexen Korrekturverfahren vorgestellt:

- radiometrische Normalisierung,
- vereinfachte Atmosphärenkorrektur,
- Korrekturmodell nach KATTENBORN 1991,
- modifiziertes MORAN-et-al.-Modell nach CHAVEZ 1996,
- Korrekturmodell TACOR nach Orthaber 1999,
- ATCOR2 nach RICHTER 1996.

Die **radiometrische Normalisierung** empfiehlt sich bei der Anpassung einer oder mehrerer Satellitenbildausschnitte auf eine Referenzszene im Rahmen einer Zeitreihenanalyse. Voraussetzung ist, daß die Atmosphäre für jeden Aufnahmezeitpunkt relativ klar und einheitlich sein muß und daß die verschiedenen Atmosphärenzustände zwischen den Szenen nicht sehr stark variieren dürfen. Dann können die Unterschiede der Atmosphärenbedingungen zwischen den Szenen minimiert werden.

Zunächst erfolgt eine Normalisierung der Sonneneinstrahlung für jeden Aufnahmezeitpunkt, indem die wellenlängenabhängige Reflexion von Zielobjekten in die vom Sensor empfangene Strahlung (s.o.) konvertiert wird über den Algorithmus

$$\rho^* = \frac{\pi * L}{E_o * \mu_0 d}$$

$P^*$	=	vom Sensor empfangene Reflexion
$L$	=	Gesamtstrahlung, die auf dem Niveau des Sensors gemessen wird
$E_o$	=	mittlere Strahlung außerhalb der Atmosphäre
$\mu_0$	=	Cosinus des Zenitwinkels der Sonne
$d$	=	Korrekturfaktor für Abweichungen der Entfernung Sonne-Erde (im Tagesgang)

mit

$$L = a_0 + a_1 * DN$$

$L$	=	gesamte vom Sensor empfangene Reflexion (Umwandlung von Digital Number in Reflexionswerte)
$a_0, a_1$	=	Kalibrationskoeffizienten des Herstellers

für die idealerweise angestrebte Konvertierung der DNs in absolute Reflexionswerte. ORTHABER gibt hierzu sowohl sensorbezogen als auch herstellerabhängig detaillierte Ableitungen der Formeln (ORTHABER 1999, S. 51). Danach werden für Oberflächen wie z.B. Asphalt- oder Betonflächen, die ihr Spektralverhalten kaum ändern, kanalweise Masken für jeden Bildausschnitt generiert. Die Maskenflächen korrelieren bezüglich der Grauwertverteilungen in der Regel sehr stark untereinander und werden kanalweise auf das Referenzbild angepaßt. Probleme entstehen jedoch durch minimale Reflexionsunterschiede der invarianten Oberflächen, durch Oberflächenfeuchte oder veränderte -rauigkeit (v.a. bei Schotterflächen) sowie durch unterschiedliche Einstrahlungsverhältnisse (HILL & STURM 1991, S. 1475 ff.).

Die **vereinfachte Atmosphärenkorrektur** basiert, abgesehen von Sensordaten, auch auf Simulationsmodellen und allgemein gültigen Algorithmen (Standard-Rayleigh-Atmosphäre nach MÖLLER 1957, S. 3 ff.; vgl. auch CRACKNELL 1997, S. 176 ff.).

Das Prinzip ist auch hier ähnlich dem des DOS-Modells: als Referenzflächen werden dunkle Flächen/Objekte mit gegen Null gehender Reflexion je Kanal gewählt. Voraussetzungen für die Berechnungen sind:

- konstante optische Dicke der Atmosphäre (Stichwort: übereinandergelagerte gegebene Zahl von Rayleigh-Atmosphären) für die Berechnung des Anteils der atmosphärischen Strahlung, wobei der Streuwinkel Sonne-Sensor berücksichtigt wird;
- die Rayleigh-Streuung wird von der Standard-Rayleigh-Atmosphäre abgeleitet;
- der Überstrahlungseffekt wird als Störgröße in den Berechnungen berücksichtigt.

Aufgrund dessen wird die tatsächliche Reflexion des Zielobjektes aus den Sensordaten zurückgerechnet mit

$$\rho_t = \frac{\pi(L - L_p)}{t(\mu)E_G} - \rho_{env}$$

$\rho_{env}$	=	Reflexionsbeitrag der Umgebung des Zielobjektes
--------------	---	---

- $L_p$  = atmosphärische Strahlung bzw. Luftlicht (weitere Details zur Berechnung: HILL & STURM 1991, S. 1479; bei der Berechnung werden berücksichtigt: Rayleigh- und Miestrahlung, Sonnenstrahlung außerhalb der Atmosphäre, wobei der Einfluß durch Ozon korrigiert wird, Winkel der Rückstreuung der Reflexion des Objektes als Azimutalwinkel zwischen Sensor und Sonne)
- $t(\mu)$  = direkte aufsteigende Transmission
- $L$  = Gesamtstrahlung, die auf dem Niveau des Sensors gemessen wird
- $E_G$  = globale Ausstrahlung am Boden.

Weitere Einflüsse wie durch atmosphärische Gase (z.B. Ozon) können mit zusätzlichen Algorithmen korrigiert werden (CRACKNELL 1997, S. 178 f.). Aufgrund empirischer Kontrollen während der Entwicklungsphase des Ansatzes wird er für Atmosphärenkorrekturen im Rahmen von Zeitreihenanalysen von HILL & STURM empfohlen (1991, S. 1478 ff.).

Auch das **Korrekturmodell von KATTENBORN** (1991) arbeitet als Inversionsmodell, das heißt, daß die originären Reflexionswerte eines Zielobjektes aus den Sensordaten unter Zuhilfenahme von Rechenmodellen zurückgerechnet werden. Für das Modell wird eine Lambertsche Oberfläche als Reflexionsfläche vorausgesetzt. Man geht zugleich vom isotropen Reflexionsverhalten der Objekte/Objektflächen aus, obwohl das im allgemeinen unrealistisch ist. Im Kontext der Rechnung kann das Problem jedoch vernachlässigt werden (vgl. HILDEBRANDT 1996, S. 491 ff.). Der Ansatz ist vor allem für elektro-optische Sensoren auf Satellitenplattformen mit nur sehr schmalen Öffnungswinkel entwickelt worden, kann aber bedingt auch anderweitig eingesetzt werden.

Das Modell unterscheidet zwei Rechenverfahren, einmal für homogene Flächen bzw. gering räumlich auflösende Sensoren und einmal für heterogene Flächen bzw. räumlich hochauflösende Sensoren. Für räumlich hochauflösende Sensoren wie z.B. Landsat TM wird die vom Sensor aufgezeichnete Strahldichte wie folgt ermittelt:

$$L_{OBS} = \frac{A}{\pi} * E_G * T_{Dir} + \frac{A_B}{\pi} * E_G * T_{Diff} + L_p$$

- $L_{OBS}$  = vom Sensor aufgenommene Strahldichte/-intensität
- $A$  = Albedo des von einem Bildelement (Pixel) erfaßten Ortes
- $A_B$  = mittlere Albedo in dessen Umgebung
- $E_G$  = Globalstrahlung
- $L_p$  = Anteil des Luftlichtes bzw. atmosphärische Strahlung
- $T_{Diff}$  = diffuse Strahlung
- $T_{Dir}$  = direkte Strahlung.

Die Formel muß zur Berechnung der Albedo (inhomogen) des Zielobjektes umgestellt werden (HILDEBRANDT 1996, S. 491 ff.):

$$A_{inh} = \frac{\pi(L_{OBS} - L_p)}{E_G * T_{Dir} - A * \left(\frac{T_{Diff}}{T_{Dir}}\right)}$$

Da die für den Einsatz der Formel benötigten Parameter über konventionelle Quellen in der Regel nicht zu beschaffen sind, müssen diese direkt aus den Sensordaten abgeleitet werden. Hierfür empfiehlt KATTENBORN folgende Vorgehensweise:

- (1) Auswahl sogenannter radiometrischer Stützpunkte, die räumlich gut verteilt sein sollten, um mögliche horizontale Schwankungen im Zustand der Atmosphäre aufzufangen. Die Stützpunkte sollten in homogenen, häufig anzutreffenden Objektklassen wie z.B. klares, tiefes Wasser, Asphaltflächen, Nadelwaldflächen liegen. Darüber hinaus wird die Empfehlung gegeben, über den NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) den Anteil der Pixel mit den höchsten Reflexionswerten in den Stützpunktklassen zu ermitteln (auch andere Vegetationsindizes können benutzt werden). Aus den gleichen Flächen ist dann der Anteil der Pixel mit den niedrigsten Reflexionswerten im NIR zu definieren. Dieser Anteil ist danach in einem Koordinatensystem senkrecht auf die NDVI-Werte abzutragen, so daß eine Schnittmenge aus Pixeln mit höchsten NDVI-Werten und niedrigsten DN<sub>s</sub> im NIR gebildet wird. Die Festlegung der jeweiligen Grenzwerte erfolgt fallweise.
- (2) Im Anschluß erfolgt die Berechnung der Atmosphärendaten z.B. mit dem Modell LOWTRAN7 (vgl. KNEIZYS et al. 1988), das die höhenabhängigen optischen Eigenschaften durch den Aerosolgehalt mit Hilfe einer Einteilung in vier Höhenschichten berücksichtigt. Berechnet werden Transmission, Emission und Reflexion der Atmosphäre und der Erdoberfläche. Außerdem werden atmosphärische Strahlung und Globalstrahlung ermittelt. Durch Ausgleich und Interpolation der Atmosphärendaten für einen gewählten Bildausschnitt wird mit Hilfe von Ausgleichssplines ein 3D-Atmosphärenmodell erstellt.
- (3) Daraufhin kann die Berechnung der atmosphärisch korrigierten Albeden erfolgen. Mangels Daten erfolgt die erste Schätzung der Umgebungsalbedo eines Zielobjektes dadurch, daß sie mit der des Zielobjektes gleichgesetzt wird. Durch iterative Rechenschritte werden dann die atmosphärisch korrigierten Albeden unter Berücksichtigung des Überstrahlungseffektes berechnet.

Das Verfahren ist mit 10 Tagen Rechenzeit für die Korrektur einer TM-Viertelszene sehr zeitaufwendig. Da geeignete Alternativen bestehen, die schneller Ergebnisse liefern, erscheint das Verfahren wenig empfehlenswert (vgl. auch HILDEBRANDT 1996, S. 495; KRAUS 1990, S. 465 f.).

Das *von CHAVEZ (1996) modifizierte und verbesserte Modell von MORAN et al. (1992)* benutzt für die Berechnung der verschiedenen Parameter ebenfalls Modelle wie LOWTRAN7 oder 5S/6S von KNEIZYS et al. (1988) bzw. TANRÉ et al. (1986).

Die tatsächliche Reflexion eines Zielobjektes wird nach diesem Korrekturverfahren berechnet mit der Formel

$$REF = \frac{(PI * (L_{sat} - L_{haze}))}{(TAU_v * (E_o * \cos(TZ)) * TAU_z + E_{down})}$$

<i>REF</i>	= wellenlängenabhängige Reflexion der (Erd-)Oberfläche
<i>Lhaze</i>	= atmosphärische, gestreute Strahlung (Luftlicht), die in Richtung des Sensors gestreut wird und auch so vom Sensor empfangen wird
<i>TAUv</i>	= atmosphärische Transmission auf dem Weg von der Oberfläche zum Sensor
<i>Eo</i>	= solare wellenlängenabhängige Ausstrahlung auf der Oberfläche senkrecht zur Sonnenstrahlung außerhalb der Atmosphäre
<i>TZ</i>	= Einfallswinkel des direkten solaren Strahlungsflusses auf die Erdoberfläche
<i>TAU</i>	= atmosphärische Transmission auf dem Weg von der Sonne zu der Oberfläche
<i>Edown</i>	= abwärts gerichtete, gestreute solare Ausstrahlung in der Atmosphäre

(CHAVEZ 1996, S. 1027).

CHAVEZ hat hierzu einen verbesserten Ansatz entwickelt, der die Fehlereinflüsse der multiplikativen Transmission minimiert und das Ergebnis dadurch verbessert. Die Eingangsparameter *TAUz* und *TAUv* werden anders hergeleitet. Dem Problem des Überstrahlungseffektes wird in diesem Modell jedoch keine Bedeutung beigemessen (CHAVEZ 1996, S. 1028 f.).

Das von ORTHABER (1999) entwickelte **Modell TACOR** (Tasseled Cap Atmospheric Correction) ist speziell auf vegetationsdominierte Areale abgestimmt und weist einige Parallelen zu ATCOR2 von RICHTER auf. Dabei bescheinigt ORTHABER seinem Modell verschiedene Vorteile wie

- schnelle Prozessierung durch hohe Datendichten,
- Verwendbarkeit im alpinen Gelände mit lokal stark schwankenden Aerosolkonzentrationen bzw. optischen Dicken in der Atmosphäre,
- Höhen- bzw. Geländemodelle sind in der Regel nicht erforderlich, wodurch Kosten und Aufwand reduziert werden können,
- der Einfluß der Rayleigh-Strahlung wird eliminiert. Dadurch wird die Abhängigkeit der vierten Tasseled Cap Komponente (TC4) als zentraler Algorithmus von der „Boden-Seehöhe“ minimiert.

Das Korrekturverfahren bezieht sich auf Landsat TM-Daten und folgt den Arbeitsschritten:

- (1) Wahl des optimalen Atmosphärenmodells und des Aerosoltyps,
- (2) atmosphärische Erstkorrektur der Landsat TM-Kanäle 3 und 4 inklusive Restaurationsverfahren,
- (3) Ausmaskieren von Nicht-Vegetationsflächen,
- (4) Berechnung der TC4 mit Interpolation der Nicht-Vegetationsflächen,
- (5) Luftlicht- und Transmissionskorrektur mittels TC,
- (6) Überstrahlungskorrektur (ORTHABER 1999, S. 63 f.).

Hierbei hebt ORTHABER unter anderem folgende Aspekte des Verfahrens hervor:

- Die Auswahl des geeigneten Aerosoltyps ist schwierig, wobei eine falsche Wahl zu eklatanten Fehlern führt. Insgesamt ist der Schritt (1) sehr aufwendig.
- Die atmosphärische Erstkorrektur weist zu diesem Zeitpunkt vernachlässigbare Fehler in der Ausmaskierung von Vegetationsflächen zu Nicht-Vegetationsflächen auf.
- Das Restaurationsverfahren dient zur Beseitigung von Fehlern, die im Zuge der TC-Korrektur entstehen. Die vierte Komponente ermöglicht Rückschlüsse auf atmosphärische Streulichteinflüsse, führt aber zugleich zu

einem hohen sogenannten „Rauschanteil“ im Landsat TM Kanal 1. Das wirkt sich negativ auf die Korrektur der anderen Kanäle aus. Zudem kommt es bei kleinräumig auftretenden großen Reflexionsunterschieden zu Fehlkorrekturen. Diese Fehlereinflüsse werden mit Hilfe der Restauration rückgängig gemacht (weiterführend: ORTHABER 1999, S. 66 ff.).

Im einzelnen sind die wichtigsten Korrekturalgorithmen wie folgt zusammenzufassen (vgl. auch CRIST & KAUTH 1986, S. 81 ff.):

TC4:

$$C4 = 0,8461 * TM1 - 0,0731 * TM2 - 0,4640 * TM3 - 0,0032 * TM4 - 0,0492 * TM5 \\ + 0,0119 * TM7 + 0,7879$$

„haze“-Korrektur:

$$TM_{CXi} = TM_{Xi} - (TC4_{(n)i} - TC4_0) * A_x$$

Restauration:

$$TM_{RXi} = TM_{CXi} - TM_{Xi} + TM_{Xi}$$

Transmissionskorrektur:

$$TM_{CCXi} = \frac{TM_{RXi}}{\tau_{dir} + \tau_{dif}}$$

mit

- $\tau_{dir}, \tau_{dif}$  = direkter und diffuser Transmissionsgrad (Anpassung über Polynom 2. Grades)
- $TC4_{(n)i}$  = störungsbereinigter und interpolierter TC4
- $A_x$  = Steigungsparameter zur „haze“-Korrektur (Anpassung über Polynom 2. Grades)
- $TC4_0$  = Tasseled Cap Komponente bei aerosolfreiem Atmosphärenzustand
- $TM_{Xi}$  = Pixel des Spektralkanals x
- $TM_{RXi}$  = Ergebnis der Restauration, Pixel i des Spektralkanals x.

Schließlich läßt sich die korrigierte Reflexion ableiten aus

$$L_{korr} = L_{bod} = \frac{L_{tot} - L_0}{\tau_{dir} + \tau_{dif}}$$

mit

$$L_0 = L_{aer} + L_{ray}$$

- $L_{aer}$  = Aerosol-Strahldichte am Sensor
- $L_{ray}$  = Rayleigh-Strahldichte am Sensor
- $L_{tot}$  = Strahldichte der Luftstreuung

und

$$L_{tot} = L_0 + \rho * \left( \frac{E_G}{\pi} \right) * \tau_{dir} + \rho * \left( \frac{E_G}{\pi} \right) * \tau_{dif} = L_0 + L_{bod} * (\tau_{dir} + \tau_{dif})$$

- $L_{tot}$  = Gesamtstrahldichte am Sensor  
 $E_G$  = Globalstrahlung (Strahlungsstärke)  
 $\rho$  = Reflexionsgrad  
 $L_{bod}$  = Gesamtstrahldichte am Boden (fiktiv bei atmosphärenfreiem Zustand).

Die weiteren Ableitungen von Algorithmen und Parametern werden in der Arbeit von ORTHABER ausführlich dokumentiert (ORTHABER 1999, S. 64 ff.). Es gelten jedoch auch für dieses Modell bestimmte Einschränkungen. So benötigt man für Detailanalysen der Daten im Rahmen der Atmosphärenkorrektur ein Höhenmodell. Diverse Zusatzdaten zur Ermittlung des Aerosoltyps oder der „Boden-Seehöhe“, die die Ergebnisse weiter optimieren, sind nur mit großem Aufwand oder gar nicht herzustellen bzw. zu bekommen (ORTHABER 1999, S. 77).

Das in ERDAS Imagine integrierbare Zusatzmodul **ATCOR2** benutzt und berücksichtigt ähnliche Parameter zur Korrektur der Atmosphäreinflüsse sowie zusätzlich der Einflüsse durch Dunst- und eingeschränkt auch Wolkenfelder. Dieses von RICHTER (1996) als räumlich-adaptiver, schneller Algorithmus zur Atmosphärenkorrektur bezeichnete Modell wurde für räumlich hochauflösende Satellitensensoren entwickelt. Unterstützt werden unter anderem die Sensoren Landsat TM, Landsat MSS sowie SPOT ab SPOT4. Es arbeitet mit einem Katalog von Funktionen zur Korrektur. In dem Katalog sind weitverbreitet auftretende Atmosphärenbedingungen über höhenabhängige Luftdruckverteilung, Lufttemperatur und -feuchte, Aerosoltypen, Zenitwinkel der Sonne etc. charakterisiert. Der Katalog wurde auf Basis von MODTRAN-2 und des SENSAT-5-Code entwickelt. ATCOR2 geht - wie viele andere Modelle auch - davon aus, daß die Zielobjekte ein isotropes Reflexionsverhalten aufweisen, wobei der Fehlereinfluß durch den Überstrahlungseffekt berücksichtigt wird.

Das Modell nutzt im Rahmen der Atmosphärenkorrektur ebenfalls die vergleichende Analyse der am Sensor gemessenen Reflexion eines Zielobjektes mit der über Modelle abgeleiteten (zurückgerechneten) Reflexion des gleichen Zielobjektes. Die gemessene Albedo wird dabei berechnet aus

$$\rho_p(\text{measurement}) = \frac{\pi L(\lambda_i) d^2}{E_s(\lambda_i) \cos \theta_s} = \frac{\pi d^2}{E_s(\lambda_i) \cos \theta_s} [c_0(i) + c_1(i) * DN]$$

wobei folgende Einflußparameter in der Formel berücksichtigt werden:

- $L(\lambda_i)$  = wellenlängenabhängige Strahlung  
 $E_s(\lambda_i)$  = extraterrestrische solare Ausstrahlung  
 $c_0(i), c_1(i)$  = Achsenabschnitt und Steigung der Kalibrationskoeffizienten  
 $\lambda_i$  = zentrale Wellenlänge  
 $\theta$  = Zenitwinkel der Sonne  
 $d$  = Entfernung Sonne-Erde.

Die vom Modell abgeleitete planetarische Albedo (Voraussetzung: Lambertsche Oberfläche), die vom Sensor aufgezeichnet werden müßte, ergibt sich entsprechend wie folgt:

$$L(\lambda) = L_0(\lambda) + \frac{E_g(\lambda)}{\pi} \rho(\lambda) [\tau_{dir}(\lambda) + \tau_{dif}(\lambda)]$$

- $L_0$  = atmosphärische Ausstrahlung bzw. Luftlicht (angenommene schwarze Strahlungsoberfläche)  
 $E_g$  = globale Ausstrahlung am Boden  
 $\tau_{dir}$  = direkter Transmissionsgrad  
 $\tau_{dif}$  = diffuser Transmissionsgrad.

Im Gegensatz zu  $L_0$  wird das Luftlicht  $L_p$  mit MODTRAN-2 hergeleitet aus

$$L_p(\lambda) = L_0(\lambda) + \frac{E_g(\lambda)}{\pi} \rho(\lambda) \tau_{dif}(\lambda)$$

$\tau_{dif}$  kann aus dem obigen Algorithmus durch Umstellung berechnet werden, während  $L_p$  über MODTRAN-2 mit  $P = 0$  ableitbar ist.

Danach erfolgt eine kanalangepaßte Berechnung der planetarischen Albedo mit Hilfe des SENSAT-5-Codes

$$\rho_p(Model) = a_0(Atm, \theta_v, \theta_s, \varphi) + a_1(Atm, \theta_v, \theta_s) * \rho$$

- $P$  = durchschnittliche Oberflächenreflexion je Kanal  
 $Atm$  = dokumentiert die Abhängigkeit von atmosphärischen Parametern  
 $\theta_v$  = Öffnungswinkel des Sensors (IFOV)  
 $\varphi$  = relativer Azimutalwinkel

$$a_0 = \frac{\pi}{\cos \theta_s} * \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) L_0(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) E_s(\lambda) d\lambda}$$

$$a_1 = \frac{1}{\cos \theta_s} * \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) E_g(\lambda) [\tau_{dir}(\lambda) + \tau_{dif}(\lambda)] d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi(\lambda) E_s(\lambda) d\lambda}$$

- $E_s(\lambda)$  = extraterrestrische solare Ausstrahlung  
 $\Phi(\lambda)$  = normalisierte Funktion der wellenlängenabhängigen Reflexion des Sensors  
 $L_0(\lambda)$  = wellenlängenabhängige Strahlung  
 $E_g(\lambda)$  = globale Ausstrahlung am Boden  
 $d(\lambda)$  = Entfernung Sonne-Erde  
 $\tau_{dir}(\lambda)$  = direkte Transmission  
 $\tau_{dif}(\lambda)$  = diffuse Transmission  
 $\theta$  = Öffnungswinkel.

Schließlich wird die Oberflächenreflexion eines Zielobjektes berechnet, wenn die gemessene planetarische Albedo mit der vom Modell abgeleiteten vereinbar ist (die Parameter sind aus den vorangehenden Algorithmen abzuleiten):

$$\rho^{(1)} = \frac{1}{a_1} \left[ \frac{\pi d^2}{E_s(\lambda_i) \cos \theta_s} \{c_0(i) + c_1(i) * DN\} - a_0 \right]$$

Dazu wird der Überstrahlungseffekt, also die Verfälschung der Reflexion eines Zielobjektes durch die überlagernden Reflexionseigenschaften der Umgebung, „herausgerechnet“. Auch hierfür bietet ATCOR2 Korrekturalgorithmen an, die den abnehmenden Einfluß der Nachbarschaft bei zunehmender Entfernung zum Zielobjekt berücksichtigen (Details unter: GEOSYSTEMS 1999, S. 77 ff.).

Die vorgestellten Verfahren zur Atmosphärenkorrektur werden in der folgenden Tabelle 3.4 vergleichend gegenübergestellt. Zusammenfassend lassen sich - vor allem in bezug auf die komplexen Korrekturverfahren - verschiedene Parallelen feststellen:

- Bevorzugt empfohlen werden bildbasierte Korrekturverfahren in Kombination mit Atmosphären- bzw. Aerosolmodellen wie LOWTRAN7 oder 5S/6S;
- Dabei werden die von dem Sensor aufgezeichneten Reflexionswerte eines Zielobjektes auf die originären Reflexionswerte zurückgerechnet.
- Als Referenz- bzw. Kalibrationsflächen für die Korrektur dienen in der Regel invariante Flächen wie Wasser-, Asphalt- oder Beton- sowie Nadelwaldflächen.
- In die Berechnungen gehen meist folgende Parameter ein
  - atmosphärische Strahlung bzw. Luftlicht,
  - globale Ausstrahlung,
  - (gerichtete) Reflexion des Zielobjektes,
  - Reflexion der Umgebung des Zielobjektes,
  - Zenitwinkel der Sonne,
  - extraterrestrische solare Ausstrahlung.

ATCOR2 wird im folgenden detaillierter erläutert, da es aufgrund der hohen Praktikabilität in der vorliegenden Arbeit für die Korrektur von Atmosphäreneinflüssen in den Satellitenbildausschnitten benutzt wird. Das Modell empfiehlt sich im Vergleich zu den anderen Modellen außerdem durch kurze Rechenzeiten mit zugleich akzeptablen Ergebnissen (im Unterschied zu einfachen Korrekturmodellen z.B.). Zudem sind die durch den Nutzer einzugebenden Parameterwerte leicht zu beschaffen. Die Auswahl an Kalibrationsdateien (s.u.) und die Möglichkeit, die Ausdehnung des Überstrahlungseffektes manuell einstellen zu können, ermöglichen es, diese Parameter auf die Gegebenheiten des Untersuchungsraums individuell anzupassen. Hinzu kommen die nutzerdefinierte Wahl der zu

Tab. 3.4: Vergleichende Gegenüberstellung der vorgestellten komplexen Näherungsverfahren

Verfahren	Literaturdokumentation	berücksichtigte Parameter	Einschränkungen/Schwächen	Praktikabilität
radiometrische Normalisierung	ORTHABER 1999 HILL & STURM 1991	<ul style="list-style-type: none"> <li>vom Sensor empfangene Reflexion</li> <li>Gesamtstrahlung auf Sensorniveau</li> <li>Zenitwinkel der Sonne</li> <li>mittlere Strahlung außerhalb der Atmosphäre</li> <li>Korrekturfaktor für Abweichungen der Entfernung Sonne-Erde im Tagesgang</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusammenstellung der Eingangsparameter ist sehr aufwendig</li> <li>Überstrahlungseffekt wird nicht berücksichtigt</li> <li>benötigt große PC-Kapazitäten und lange Rechenzeiten</li> </ul>	durchschnittlich/ befriedigend bis gering
vereinfachte Atmosphärenkorrektur	CRACKNELL 1997 HILL & STURM 1991	<ul style="list-style-type: none"> <li>Überstrahlungseffekt</li> <li>Standard-Rayleigh-Atmosphäre</li> <li>Luftlicht</li> <li>direkte aufsteigende Transmission</li> <li>Gesamtstrahlung auf Sensorniveau</li> <li>globale Ausstrahlung am Boden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusammenstellung der Eingangsparameter ist sehr aufwendig</li> <li>benötigt relativ große PC-Kapazitäten, die Rechenzeiten sind ebenfalls relativ lang</li> </ul>	durchschnittlich/ befriedigend
Korrekturmodell von KATTENBORN	HILDEBRANDT 1996 KATTENBORN 1991 KRAUS 1990	<ul style="list-style-type: none"> <li>vom Sensor empfangene Reflexion</li> <li>Globalstrahlung</li> <li>Luftlicht</li> <li>diffuse und direkte Strahlung</li> <li>Umgebungsalbedo</li> <li>Objektalbedo</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusammenstellung der Eingangsparameter ist sehr aufwendig</li> <li>benötigt sehr lange Rechenzeiten von bis zu 10 Tagen, entsprechend große PC-Kapazitäten sind erforderlich</li> <li>Überstrahlungseffekt wird nur bedingt berücksichtigt</li> </ul>	nicht praktikabel wegen der langen Rechenzeiten
modifiziertes Modell nach MORAN et al.	CHAVEZ 1996 MORAN et al. 1992	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reflexion der Erdoberfläche</li> <li>atmosphärische Transmission</li> <li>Luftlicht</li> <li>Ausstrahlung der Erdoberfläche und deren Streuung in der Atmosphäre</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusammenstellung der Eingangsparameter ist sehr aufwendig</li> <li>benötigt relativ lange Rechenzeiten und entsprechende PC-Kapazitäten</li> <li>Überstrahlungseffekt wird nicht berücksichtigt</li> </ul>	durchschnittlich/ befriedigend bis gering
Modell TACOR	ORTHABER 1999	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gesamtstrahldichte am Sensor</li> <li>Globalstrahlung</li> <li>Gesamtstrahldichte am Boden</li> <li>Luftlicht</li> <li>Überstrahlungseffekt</li> <li>direkte und diffuse Transmission</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusammenstellung der Eingangsparameter ist sehr aufwendig</li> <li>zur Optimierung der Genauigkeit werden Zusatzparameter wie DGM oder Daten zur Ermittlung des Aerosoltyps sowie der „Boden-Seehöhe“ benötigt, die nur mit sehr großem Aufwand oder gar nicht herzustellen bzw. zu bekommen sind</li> </ul>	durchschnittlich/ befriedigend
Modell ATCOR2	GEOSYSTEMS 1999 RICHTER 1996	<ul style="list-style-type: none"> <li>Gesamtstrahlung am Sensor</li> <li>extraterrestrische solare Ausstrahlung</li> <li>Zenitwinkel der Sonne</li> <li>Entfernung Sonne-Erde</li> <li>Luftlicht</li> <li>direkter und diffuser Transmissionsgrad</li> <li>Überstrahlungseffekt</li> <li>Öffnungswinkel des Sensors</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>kleinräumig variierende Atmosphärenzustände werden in dieser Version nicht berücksichtigt (erst ab nachfolgender Version geplant)</li> </ul>	hoch

korrigierenden Kanäle und die Festlegung der Größe des Untersuchungsraums, die die Nutzerorientierung und somit den Komfort in der Bedienung des Moduls erheblich verbessern.

Das Modul ATCOR2 ist in mehrere „Submodule“ gegliedert:

- „Sun-position calculator“,
- „ATCOR2 Main Menu“,
- „Spectra“,
- „Constant atmosphere“, „Spatially varying atmosphere“ oder „Spatially varying atmosphere (external visibility file)“ (vgl. Abb. 3.18).

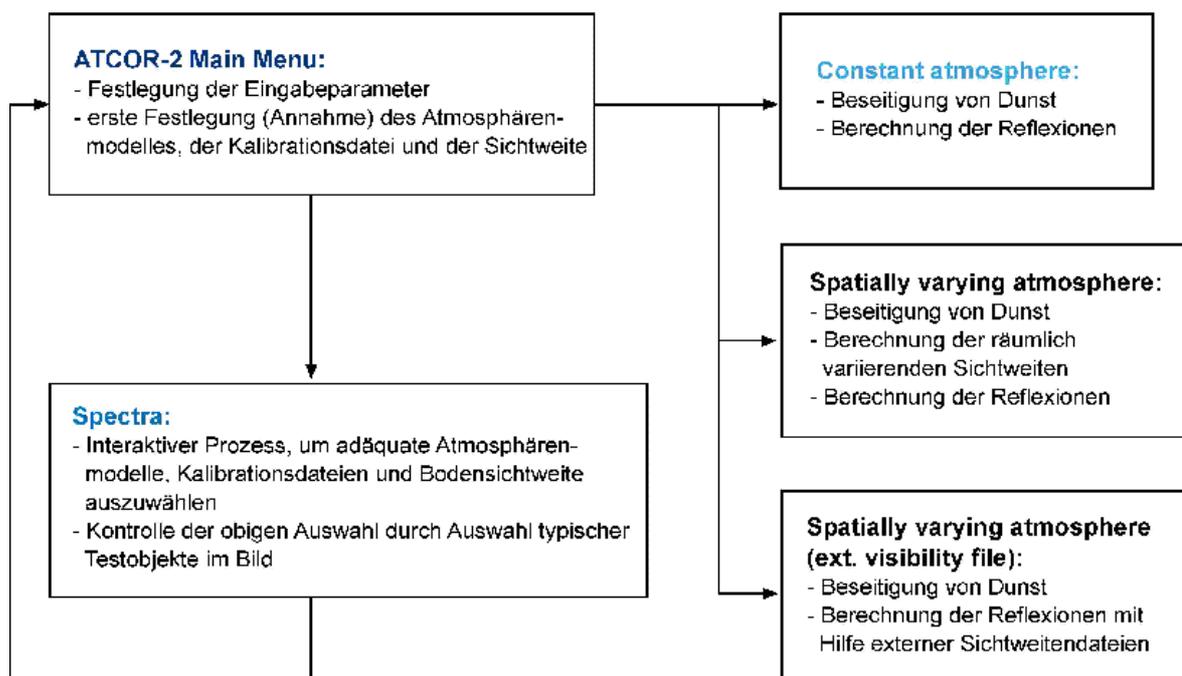


Abb. 3.18: Organigramm der zentralen Submodule in ATCOR2. Quelle: GEOSYSTEMS 1999, S. 24

Mit Hilfe des „Sun-position calculators“ werden der Zenit- und der Azimutalwinkel der Sonne zum Aufnahmezeitpunkt am gegebenen Ort berechnet, so daß sie als Eingabeparameter im „ATCOR2 Main Menu“ zur Verfügung stehen.

Insgesamt sind über das „ATCOR2 Main Menu“ folgende Parameter einzugeben:

- (1) der zu korrigierende Bilddatensatz und die Ausgabedatei,
- (2) Auswahl der zu korrigierenden Kanäle,
- (3) Sensorspezifikationen (Kalibrationsdateien),
- (4) Atmosphärenmodell (in der Regel durch Abgleich von Sekundärquellen, z.B. aerologischen Daten des DWD mit den Parametern der implementierten Modelle, s.u.),
- (5) Größe des Untersuchungsraumes,
- (6) Filtergröße für die Berücksichtigung bzw. Minimierung des Überstrahlungseffektes, Korrekturfaktoren der Reflexion und Emission, um den Dynamikbereich der Ausgabedatei durch Reskalierung (8 bit) maximal nutzen zu können. Für die Generierung von

absoluten Reflexionswerten in den einzelnen Kanälen wird der Korrekturfaktor auf 1 gesetzt.

- (7) Informationen zu Aufnahmedatum, Zenitwinkel, mittlerer Geländehöhe, Sichtweite aus Sekundärquellen,
- (8) Anwahl des Moduls „Spectra“, um zu prüfen, ob das gewählte Atmosphärenmodell sowie die Sichtweite adäquat sind, ggfs. iterative Anpassung der Parameter (die Nutzung des Moduls ist fakultativ),
- (9) Wahl der zutreffenden Atmosphärenbedingungen aus „konstant“ und „räumlich variierend“ durch Abgleich mit Sekundärquellen etc. für die weiteren Arbeitsschritte (vgl. hierzu GEOSYSTEMS 1999, S. 23).

Mit dem Modul „Spectra“ werden gezielt Objekte des Rohdatensatzes mit charakteristischen Reflexionen auf ihr tatsächliches Reflexionsverhalten bei gegebenen Parametern in den Wellenlängenbereichen des angegebenen Sensors hin geprüft. Durch iterativen Vergleich der Spektralsignaturen mit den im Modell implementierten Signaturen repräsentativer Objekte (z.B. Asphalt, Wasser, Nadelwald) werden die Parameter „Atmosphärenmodell“ und „Sichtweite“ des „ATCOR2 Main Menu“ angepaßt und mit den Sekundärquellen abgeglichen. Danach erfolgt die Auswahl nach der Vorgabe unter Punkt (9).

In dieser Arbeit wird die Korrektur mit dem Modul „Constant Atmosphere“ durchgeführt. Folglich konzentrieren sich die Erläuterungen im weiteren Text auf dieses Modul.

Über das dazu gehörige Dialogfenster sind folgende Funktionen abzuarbeiten:

- (1) Entscheidung treffen, ob für das Bild nur die Atmosphäre korrigiert werden muß, oder ob zusätzlich noch eine Korrektur des Dunstgehaltes oder aufgrund von Wolkenfeldern erforderlich ist. Die Entscheidung kann gestützt werden durch exemplarische Untersuchungen im Bild mit Hilfe von „Spectra“ sowie durch Informationen aus zusätzlichen Quellen.
- (2) Bei der Korrektur von Dunst- bzw. Wolkengehalt: Wahl der Schwellenwertmethode für die Auswahl der Referenzpixel: Standard - Interaktiv;
- (3) Definition, wie der Übergangsbereich von Dunstregionen zu sogenannten klaren Regionen in seiner Radiometrie im Rahmen der Korrektur angepaßt werden soll (z.B. Histogrammverschiebung);
- (4) Berechnung der Masken für Dunst, Wolken und Sichtweiteninformation sowie des Endergebnisses mit Hilfe des im „Spatial Modeler“ implementierten Modells (weiterführend hierzu: RICHTER 1996, S. 1201 ff.; GEOSYSTEMS 1999, S. 34 ff.).

Bei der Wahl der Schwellenwertmethode ist die interaktive Variante der Standardvariante vorzuziehen, da der Nutzer damit Gelegenheit hat, individuelle Anpassungen an vorhandene Dunst- oder Wolkenfelder vorzunehmen. Im Rahmen der Standardmethode kann der Nutzer weder die benutzten Schwellenwerte des Moduls betrachten und nachvollziehen noch kann er sie benutzerorientiert verändern. Durch das interaktive Verfahren können die Ergebnisse wesentlich optimiert werden (iterative Arbeitsweise, wobei die Schwellenwerte durch Vergleich der Masken mit dem Eingabebild angepaßt werden können).

Allerdings ist eine intensive Auseinandersetzung mit der Thematik sowie mit dem Verfahren ATCOR2 dringend geboten, da der gesamte Themenkomplex in der Literatur nur vereinzelt erläutert wird (vgl. RICHTER 1996, S. 1201 ff.) und das Handbuch zu ATCOR2 relativ oberflächlich und benutzerunfreundlich ist. Wichtige Arbeitsschritte wie z.B. die Auswahl geeigneter Schwellenwerte im Zuge der interaktiven Referenzflächenauswahl werden auf die Reihenfolge der Funktionen reduziert dargestellt, ohne dem Nutzer Verständigungshilfen über die Auswirkungen der jeweils festgelegten Schwellenwerte zu geben.

Das Design der Dialogfenster wie auch das des Handbuchs verführt zudem dazu, immer auch eine Korrektur des Dunst- bzw. Wolkengehaltes zusätzlich zur einfachen Atmosphärenkorrektur durchzuführen. Dies führt bei Satellitenbilddausschnitten, die nur zu sehr geringem Anteil mit Dunstschleiern etc. belastet sind, zu lokalen Überkorrekturen im Bild. Hierdurch werden die radiometrischen Eigenschaften verfälscht, und das Bild wird für weitere Analysen unbrauchbar. Dem kann man vorbeugen, indem man eine Histogrammanalyse der Rohdaten wie auch stichprobenartige Untersuchungen der Reflexion von Beispielflächen durchführt, um „ein Gefühl“ für die Qualität der Daten zu bekommen (evtl. mit Hilfe von „Spectra“). Daraufhin kann man entscheiden, ob eine Atmosphärenkorrektur ausreichend ist oder zusätzlich der Dunstgehalt minimiert werden muß.

Eine weitere Schwäche des Moduls besteht darin, daß in der Regel Flächen, die ein ähnliches Spektralverhalten wie Dunstregionen in den für die Schwellenwerte relevanten Wellenlängenbereichen aufweisen, auch als Referenzflächen ausgewiesen werden. So muß der Nutzer im allgemeinen Flächen wie hochversiegelte Bereiche, Sand- oder Abgrabungsflächen durch Korrekturen an der Dunstmaske eliminieren. Daraufhin kann die korrigierte Maske als externe Datei erneut eingespeist werden, und die Berechnung erfolgt mit „Spatially varying atmosphere (external visibility file)“.

Selbstverständlich können die vorgestellten Verfahren die tatsächlichen Atmosphärenbedingungen nur näherungsweise herbeiführen. Als Folge davon können die Einflüsse der Atmosphäre auf die originären Reflexionswerte auch nur näherungsweise reduziert bzw. minimiert werden. Eine Ausnahme dazu bietet das - aufgrund zu hoher Kosten und zu intensivem Aufwand nur für Forschungszwecke zu realisierende - Verfahren der zeitgleichen Messungen der Reflexionen im Gelände sowie der flugzeug- und satelliten-gestützten Messungen von Reflexion und Atmosphärenbedingungen.

Hinzu kommt, daß atmosphärisch korrigierte Datensätze nicht zwingend die Qualität von Datenanalysen wie z.B. bei klassischen Klassifikationsverfahren steigern. Denn vielfach führt die Korrektur zu höheren Detailkontrasten und somit zu größeren Schwankungsbreiten der Reflexion innerhalb eines sonst als „homogen“ zu bezeichnenden Objekttyps (z.B. Nadelwald).

Trotz der Imponderabilien wie der nur genäherten Ermittlung der vielen Eingangsparameter und letztendlich auch des Endergebnisses empfiehlt sich aufgrund der in der Literatur

verbreiteten positiven Erfahrungen bei der Arbeit mit korrigierten Satellitenbilddaten eine Atmosphärenkorrektur der Satellitenbilddaten im Rahmen der Datenvorprozessierung auch für diese Studie (dies wird bestätigt durch MATHER 1999, S. 88 ff.; HILL & STURM 1991, S. 1471 ff.; CHAVEZ 1996, S. 1025 ff.; RICHTER 1996, S. 1201 ff.). Dies wird durch eigenständige stichprobenartige Untersuchungen an ausgewählten Beispielszenen aus der vorliegenden Arbeit, für die ATCOR2 im Rahmen einer Vorstudie angewendet wurde, gestützt.

### 3.2.2 Vorprozessierung: Atmosphärenkorrektur der benutzten Satellitenbildausschnitte

Mit dem Einsatz von ATCOR2 können die Bildausschnitte der Satellitenbildszenen vom 01.05.1986, 17.05.1986, 02.07.1991 (jeweils Landsat TM-Szenen) sowie der Landsat MSS-Szene vom 02.07.1991 korrigiert werden (Sensorspezifikationen: vgl. Tab. A.1, Anhang A).

Die Korrektur erfolgt einmal mit Hilfe des auf den jeweiligen Datensatz angepaßten Korrekturfaktors für die Reflexion, so daß der Ergebnisdatensatz den gesamten Dynamikbereich von 8 bit (DNs) ausnutzt (vgl. GEOSYSTEMS 1999, S. 22). Zudem wird eine Korrektur vorgenommen, die in den Ergebnisbildern die absoluten Reflexionswerte in Prozent (%) wiedergibt (Korrekturfaktor = 1). Die in ATCOR2 gewählte Skalierung der Abszisse im Rahmen der Histogrammdarstellung von 0-255 für einen Datensatz, der Prozentwerte der Reflexion darstellt, ist zunächst irritierend. Sie wird jedoch vom Modul in der Voreinstellung in dieser Form angeboten. Je nach weiterführenden Analysemethoden stehen somit Datensätze verschiedener Qualität und Auflösung zur Verfügung (DN- bzw. Prozentskalierung).

Für die notwendigen Eingabeparameter für den „Sun-position calculator“ und das „ATCOR2 Main Menu“ sind folgende Informationen bereitzustellen:

- Lagekoordinaten des Untersuchungsgebiets (gemittelte Koordinaten),
- Geländehöhe des Untersuchungsgebiets (gemittelt),
- Luftdruck in hPA, dazugehörige Höhenschichtung der Atmosphäre in km,
- Lufttemperatur in °C,
- absolute Feuchte in  $\text{g}/\text{m}^3$ ,
- relative Feuchte in %,
- Bodensichtweite.

Die benötigten Parameter werden für den Untersuchungsraum den aerologischen Wettermeldungen der Wetterstation Essen entnommen und in dem Tabellenkalkulationsprogramm MS EXCEL über automatisierte Routinen umgewandelt, da für einen Vergleich der Atmosphärenmodelle Angaben für die relative und die absolute Feuchte benötigt werden; die DWD-Daten liefern die Feuchteverhältnisse jedoch nur in Form der Taupunkttemperatur (vgl. LITTMANN et al. 1994, S. 42, 94 ff.).

Für die Korrektur wird das Modul „Constant Atmosphere“ gewählt, da das Untersuchungsgebiet relativ klein ist und in der Mehrzahl der Satellitenbildszenen die Atmo-

sphärenbedingungen über dem Untersuchungsraum unproblematisch sind. Als Atmosphärenmodell eignet sich für alle Aufnahmezeitpunkte das der „US Standard Atmosphere 1976 (urban)“, da hier die einzelnen Parameter (Temperatur nach Höhen- und Luftdruckschichtung, absolute und relative Feuchte) den Daten für den Untersuchungsraum am meisten ähneln (vgl. Anhang B, Tab. B.1, B.2).

Die Analyse der Wetterdaten (z.B. Sichtweiteninformation) sowie die stichprobenartige Überprüfung der Reflexionswerte repräsentativer Oberflächen zeigen, daß aufgrund der jeweiligen Atmosphärensituationen zum Zeitpunkt der Aufnahmen vom 01.05.1986 und 02.07.1991 für diese Szenen eine Atmosphärenkorrektur adäquat ist; eine weiterführende Korrektur von Dunst oder Wolkenfeldern würde zu fehlerhaften Überkorrekturen führen.

Anders verhält es sich mit dem Szenenausschnitt vom 17.05.1986. Der Ausschnitt ist stark durch hochnebel- und schleierartige Dunst- und Wolkenflächen beeinträchtigt, so daß neben der einfachen Atmosphärenkorrektur auch eine Korrektur des Dunstgehaltes erforderlich ist.

Im Modul „Constant Atmosphere“ wird im Zuge der interaktiven Schwellenwertmethode für  $T_3 = 0,7$  und  $T_4 = 2,0$  als Voreinstellungen gewählt, da hiermit die Dunst- und Wolkenmaske die Ausgangssituation im zu bearbeitenden Bildausschnitt am genauesten wiedergibt. Als zusätzliche Information wird noch die Sichtweiteninformation berechnet. Die Masken zeigen trotzdem die oben erwähnten Schwächen (falsche Referenzflächen). So werden z.B. stark versiegelte Bereiche wie die Anlage CWH als Dunst- bzw. Wolkenflächen ausgewiesen. Diese Fehler in der Maske müssen durch Elimination der falschen Referenzflächen korrigiert werden. Danach wird die korrigierte Maske unter „Spatially varying atmosphere (external visibility file)“ erneut eingespeist und das Endergebnis berechnet. Da keine weiteren Möglichkeiten für die Eingabe korrigierter Masken bestehen, muß man - trotz der Wahl „Constant Atmosphere“ - auf die genannte Variante zurückgreifen.

Im korrigierten Ergebnisbild werden - wie für die zuvor korrigierten Bildausschnitte auch - stichprobenartige Kontrollen der korrigierten Reflexionswerte (DNs und Prozentwerte) an repräsentativen Objekten wie z.B. Wasserflächen durchgeführt. Im Vergleich mit den anderen korrigierten Landsat TM-Bildern ergeben sich gerade für invariante Flächen wie z.B. Gewässer starke Abweichungen in den Werten. Die Gründe für die Abweichungen können vielfältig sein; häufig handelt es sich um geringe Instabilitäten in der Sensorkalibration. Hierüber konnten jedoch keine schlüssigen Auskünfte eingeholt werden.

Um die Vergleichbarkeit der verschiedenen Datensätze zu optimieren, wird die korrigierte Version des Satellitenbildausschnitts vom 17.05.1986 zusätzlich durch eine Histogrammverschiebung verbessert. Hierdurch wird der durch das Histogramm belegte Bereich der Abszisse kanalabhängig um gemittelte Korrekturfaktoren nach links verschoben („Raster“ > „General Contrast“ > „Linear“ > „Shift“; „Interpreter“ > „Radiometric Enhancement“ > „LUT Stretch“, vgl. Abb. 3.19).

Dadurch entsteht ein neuer, korrigierter Datensatz (Beispiel: vorher: 01.05.86: DN = 2, 17.05.86: DN = 25, 02.07.91: DN = 8; nachher: 01.05.86: DN = 1, 17.05.86: DN = 7, 02.07.91: DN = 0). Insgesamt werden die Ausschnitte damit vergleichbar.

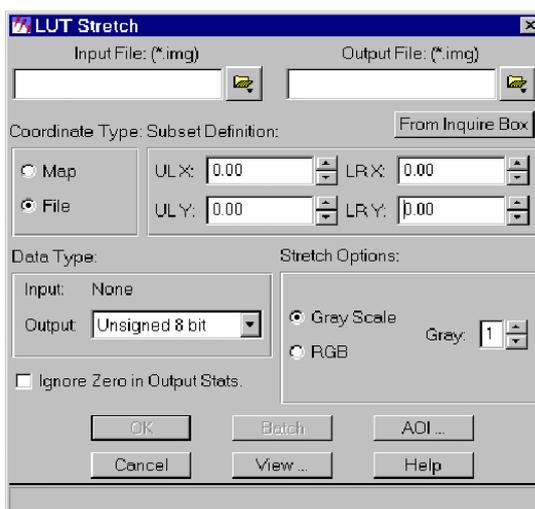
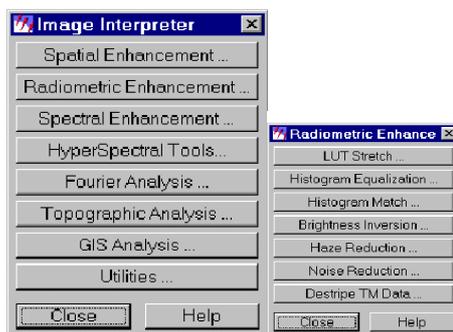
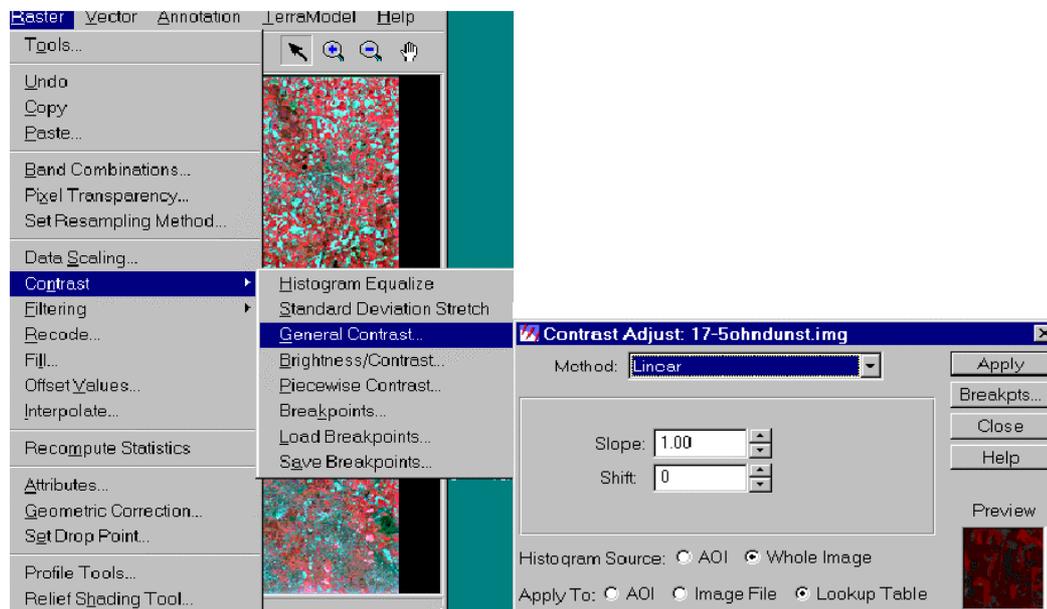


Abb. 3.19: Funktionen in ERDAS Imagine zur Durchführung der kanalweisen Histogrammverschiebung des Landsat TM-Datensatzes vom 17.05.1986 (screenshots)

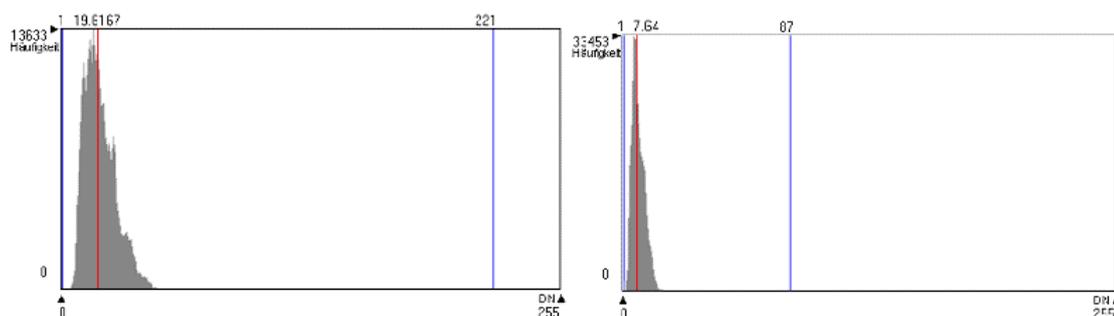
Im folgenden werden die korrigierten Datensätze mit Hilfe der Histogramme und der Statistiken bezüglich ihrer radiometrischen Eigenschaften charakterisiert. Obwohl für die weiteren Analysen vor allem die Kanäle Rot, NIR und MIR genutzt werden, soll an dieser Stelle ein umfassender Überblick über die Eigenschaften der Bildausschnitte gegeben werden. Die in den Tabellen B.3 - B.7 (Anhang B) vergleichend aufgeführten Gipfelpunkte („peaks“) weisen auf Konzentrationsbereiche von Grauwerten in den korrigierten Datensätzen hin. Diese Gipfel sind im allgemeinen als relativ homogene Reflexion eines Objekttyps zu interpretieren. Je nach Schwerpunktbereich der Grauwertverteilungen je Kanal ist ein Datensatz als eher „dunkel“, „hell“ oder von „mittlerer Helligkeit“ anzusprechen.

Die Standardabweichung (STA) je Kanal gibt Auskunft über die Homogenität bzw. Inhomogenität des Datensatzes; sie ist datensatzorientiert im Anhang zusammen mit der Auflistung der weiteren statistischen Maßzahlen belegt (atmosphärenkorrigierte Datensätze: Tab. B.3 bis B.7 im Anhang B). Im allgemeinen gilt: je inhomogener die Verteilung, desto detailliertere Analysen zum Spektralverhalten von Objekttypen sind möglich. Denn in diesen Fällen ist eine Differenzierung der Reflexionen sehr viel besser möglich, als wenn eine sehr homogene, enge Grauwertverteilung vorläge.

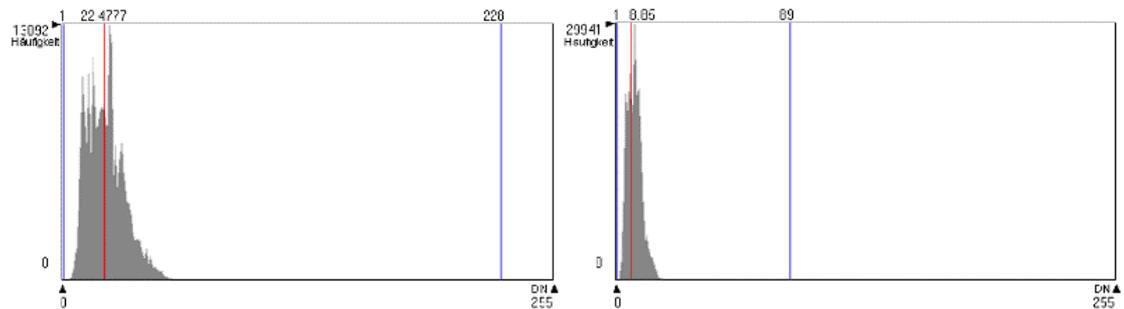
Die benutzten Datensätze sind insgesamt als recht dunkel und kontrastarm zu charakterisieren (vgl. die Histogramme und Statistiktabelle Abb. 3.20, 3.22, 3.23, 3.25; Tab. B.3 bis B.6 im Anhang B). Dies gilt besonders für die auf Prozentwerte korrigierten Daten, denn diese Datensätze sind nicht auf den Grauwertbereich 0-255 gestreckt, wie es für die auf DN-Werte korrigierten Datensätze gegeben ist. Infolge dessen konzentrieren sich die Grauwerte auf den Wertebereich von 0 bis maximal 127. Für die weiteren Arbeits- und Analyseschritte sind radiometrische Verbesserungen der Daten folglich unerlässlich.

Im folgenden werden die Histogramme der korrigierten Datensätze vom 01.05.1986, 17.05.1986 und vom 02.07.1991 abgebildet. Dabei werden die korrigierten Histogramme pro Datum einmal in der DN-kalibrierten Version (links) und einmal in der prozent-kalibrierten Version (rechts) dokumentiert. Auf der x-Achse sind die Grauwertstufen 0-255 abgetragen, während auf der y-Achse die Häufigkeiten, mit denen die verschiedenen Grauwertstufen auftreten, abzulesen sind (inklusive maximale Häufigkeit). Zusätzlich sind am oberen Rand der Histogrammdarstellungen von links nach rechts die jeweiligen Minimum-, die arithmetischen Mittel- und die Maximumwerte ausgewiesen.

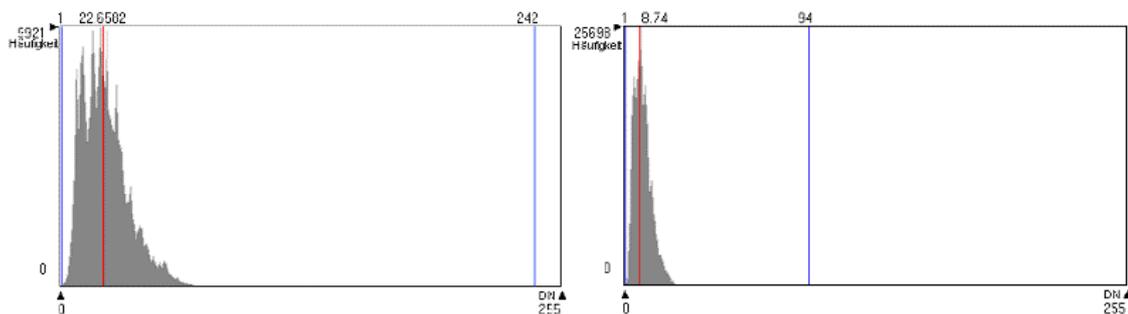
Kanal 1:



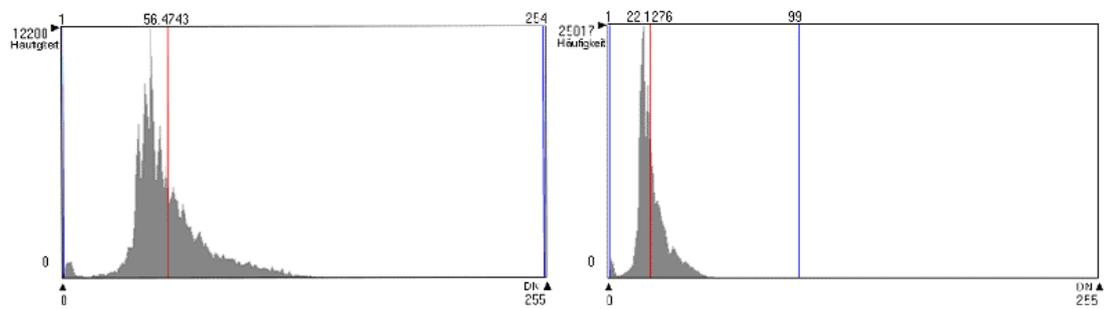
Kanal 2:



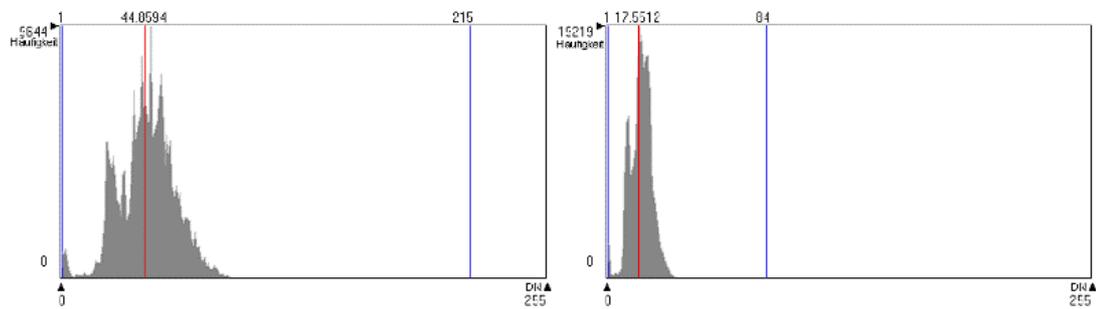
Kanal 3:



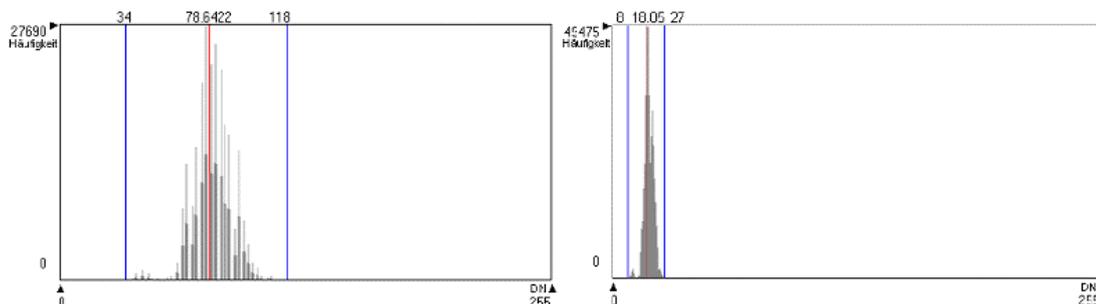
Kanal 4:



Kanal 5:



Kanal 6:



Kanal 7:

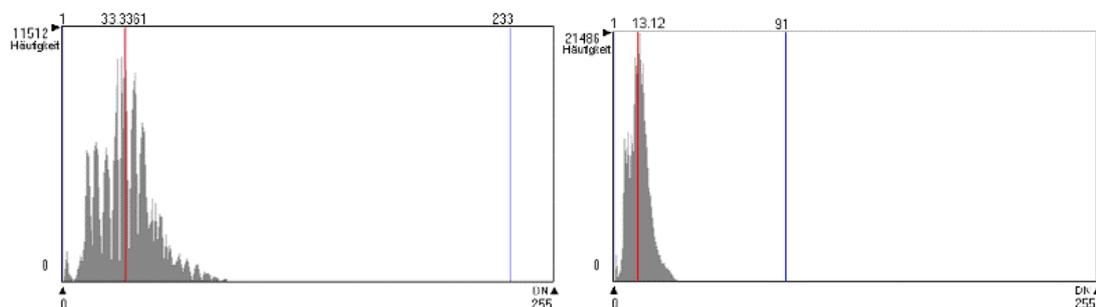


Abb. 3.20: Korrigierter Landsat TM-Satellitenbildausschnitt vom 01.05.1986: Histogramme (DNs links, Prozentwerte rechts). Quelle: ERDAS Imagine: Image Info, verändert

Sowohl für den auf DN kalibrierten Datensatz als auch für den die Prozentreflexion wiedergebenden Datensatz ist die Verschiebung der Histogrammverläufe nach links gegen Null sichtbar. Dies ist eine logische Folge des „Herausrechnens“ der Atmosphäreneinflüsse.

In beiden Fällen sind die neu generierten Datensätze erheblich dunkler als der Rohdatensatz. Jedoch streut die DN-Verteilung im abgebildeten Datensatz viel breiter als im Rohdatensatz; die Daten werden besser interpretierbar. Die Histogramme des auf Prozentwerte korrigierten Datensatzes sind allerdings für alle Kanäle extrem dunkel, der Konzentrationsbereich der Grauwerte ist sehr eng. Eine Interpretation dieser Daten ist ohne radiometrische Verbesserung kaum möglich.

Die Konzentrationsbereiche für die die DN-Verteilung darstellenden Histogramme sind in den Kanälen 1, 2, 3, 5 und 7 vergleichsweise breit angelegt. Wie eine vergleichende Analyse mit den Landsat TM Datensätzen vom 17.05.1986 und vom 02.07.1991 ergibt, reduziert sich dies im Jahresverlauf. Demgegenüber nimmt die Breite des Konzentrationsbereichs des Landsat TM Kanals 4 vom 01.05.1986 bis zum 02.07.1991 deutlich zu (vgl. Abb. 3.21, links: Kanal 3, rechts: Kanal 4 in chronologischer Reihenfolge).

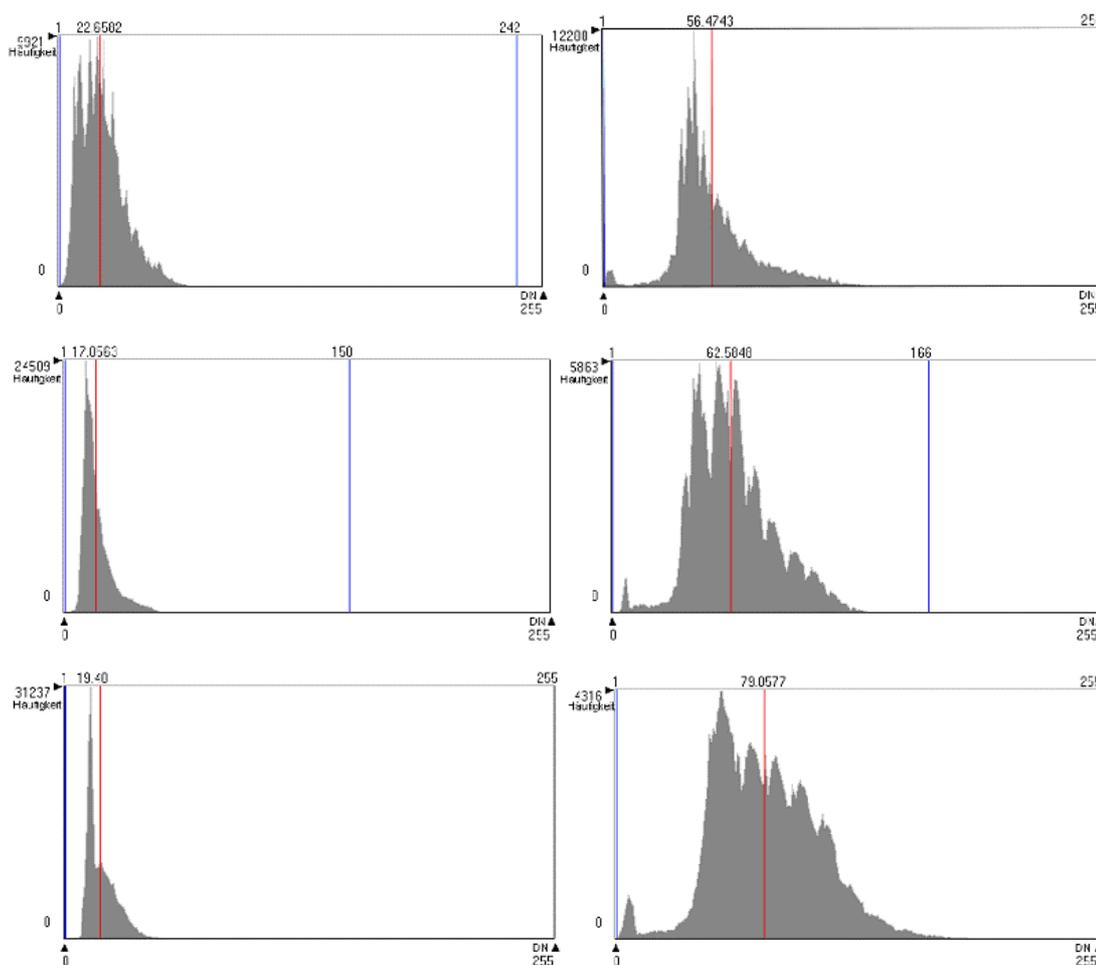


Abb. 3.21: Vergleich der Entwicklung der Histogramme der Landsat TM-Kanäle 3 (links) und 4 (rechts) im zeitlichen Verlauf: 01.05.1986, 17.05.1986, 02.07.1991. Quelle: ERDAS Imagine: Image Info, verändert

Darüber hinaus nehmen ebenfalls die Anzahl und die Unterscheidbarkeit der Gipfel zu: die einzelnen Objekttypen lassen sich aufgrund ihrer Spektralsignaturen besser isolieren.

In der Dynamik der Histogramme der Landsat TM Kanäle 1, 2, 3, 4, 5 und 7 spiegelt sich - trotz der verschiedenen Jahre - scheinbar die Entwicklung der phänologischen Phasen der Vegetation wider. Diese ist in ihrem Wachstum Anfang Mai erfahrungsgemäß nicht soweit fortgeschritten wie Anfang Juli. Zugleich nimmt ihr Anteil an der Oberflächenreflexion zu, und sie überdeckt teilweise die Reflexion von versiegelten Flächen, kahlen Untergründen oder Wasserflächen.

Für die Landsat TM Kanäle 3, 4 und 5, die bevorzugt für ein fernerkundlich gestütztes Monitoring im Sinne dieser Studie genutzt werden, ist die Entwicklung an der Streubreite der Konzentrationsbereiche wie folgt abzulesen:

Kanal 3:

01.05.	1-67
17.05.	3-50
02.07.	7-49

Die Reflexion nimmt erwartungsgemäß mit der fortschreitenden Pflanzenentwicklung und -vitalität ab (vgl. Abb. 4.2).

Kanal 4:

01.05.	1-139
17.05.	2-135
02.07.	1-186

Auch wenn die Werte für den 17.05. nicht die ideale Entwicklung zeigen, dokumentiert die zunehmende Reflexion (quantitativ und grauwertorientiert) erwartungsgemäß die Entwicklung der Pflanzenvitalität.

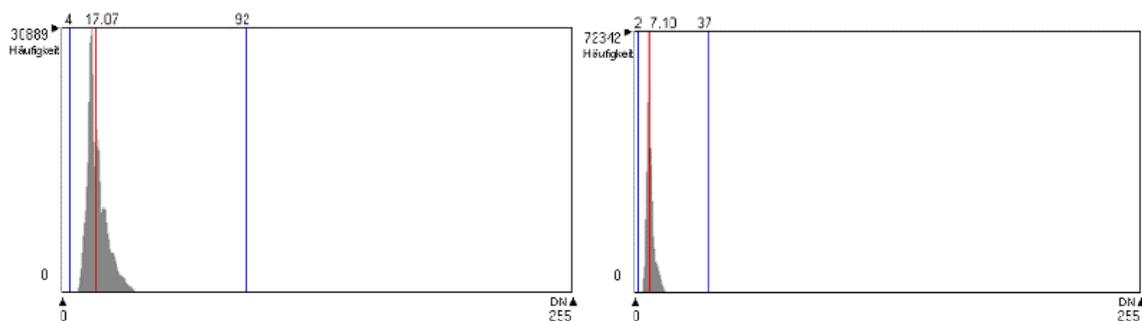
Kanal 5:

01.05.	1-90
17.05.	3-76
02.07.	1-70

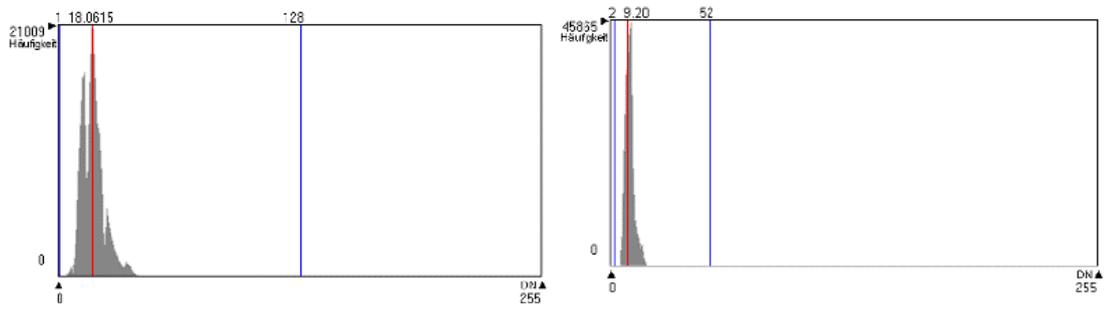
Wenn sich die Pflanzen normal entwickeln und z.B. keinem Trockenstress ausgesetzt sind, nimmt die Reflexion im MIR bis zur Reifephase sukzessive ab (z.B. Erntezeit von Getreide: Reflexion im MIR wieder zunehmend). Im Verlauf der Entwicklung reduziert sich die Reflexion erwartungsgemäß (vgl. Abb. 4.2).

Im folgenden werden die Histogramme (DN-Werte und Prozentwert) für den Landsat TM-Szenenausschnitt vom 17.05.1986 dargestellt.

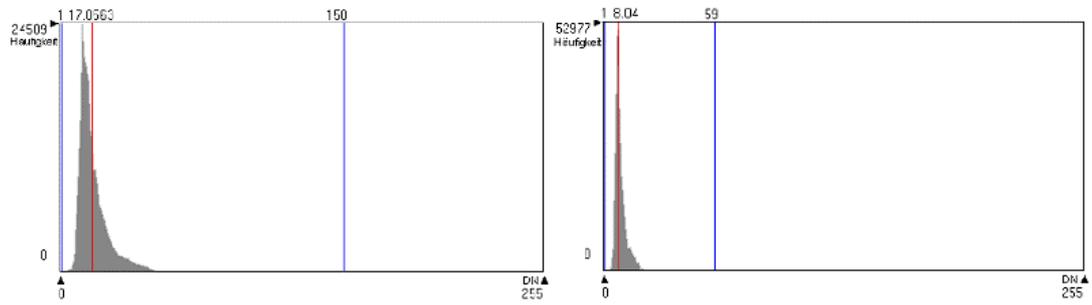
Kanal 1:



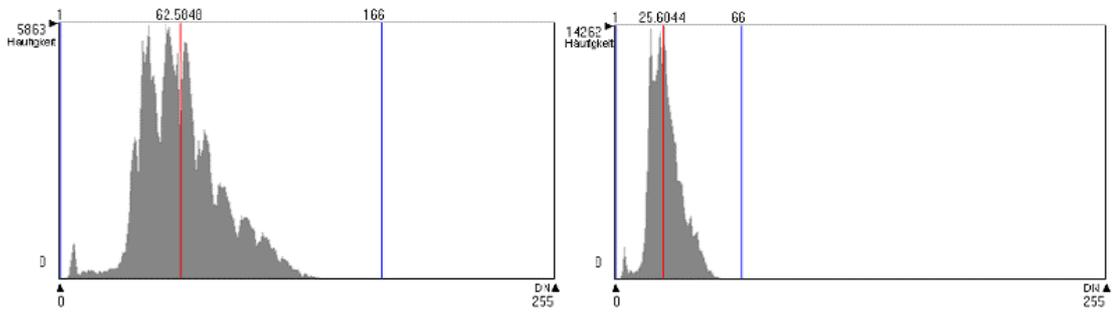
Kanal 2:



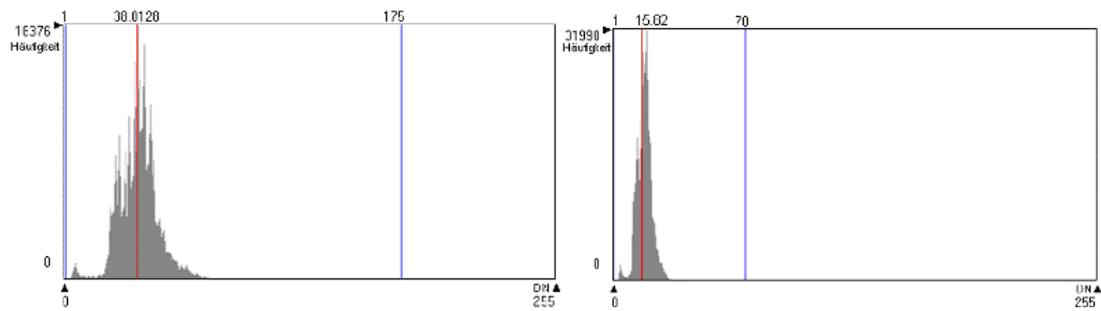
Kanal 3:



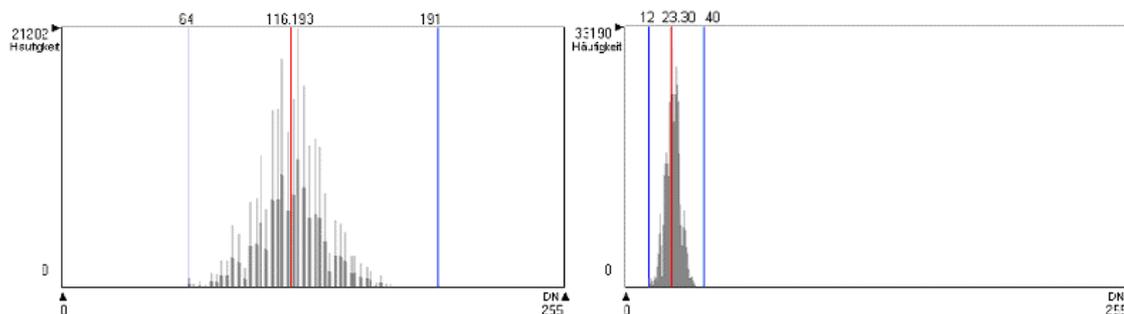
Kanal 4:



Kanal 5:



Kanal 6:



Kanal 7:

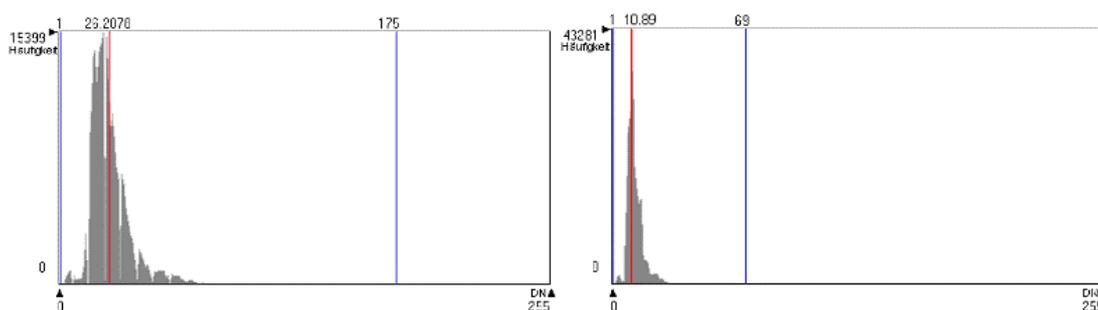
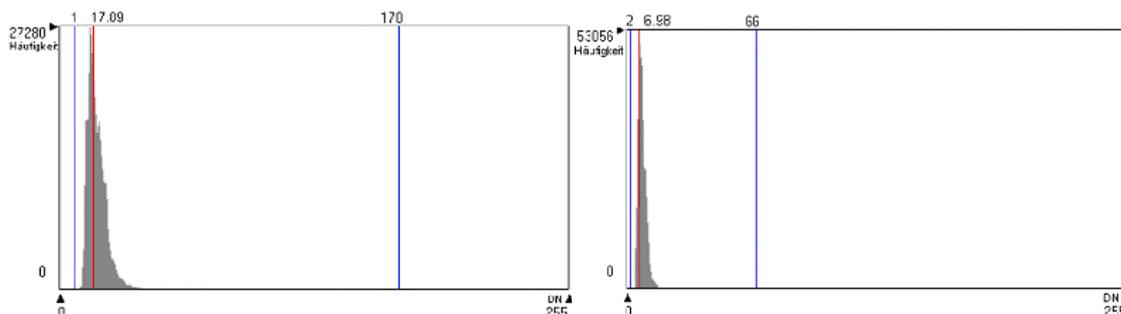


Abb. 3.22: Korrigierter Landsat TM-Satellitenbildausschnitt vom 17.05.1986: Histogramme (DNs links, Prozentwerte rechts). Quelle: ERDAS Imagine: Image Info, verändert

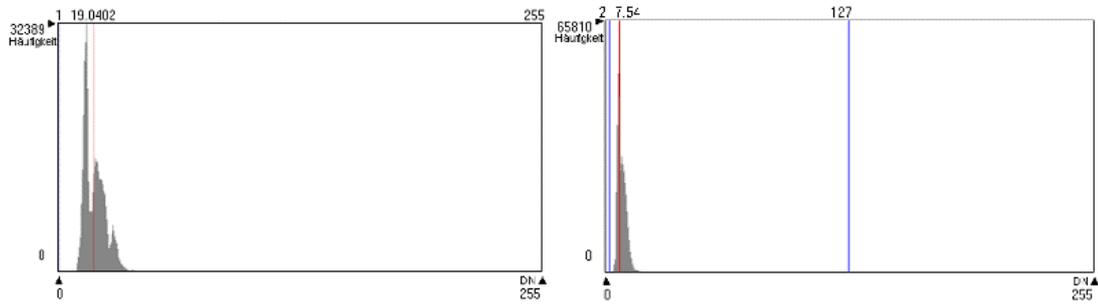
Auch hier - wie schon zuvor bei den Histogrammen vom 01.05.1986 - sind die korrigierten Datensätze auf der Abszisse nach links gegen Null verschoben. Zudem bleibt der Trend des breiteren Konzentrationsbereichs der die DN-Werte abbildenden Histogramme gegenüber den die Prozentwerte darstellenden Histogrammen bestehen. Auch hier führt die Atmosphärenkorrektur erneut zu einer besseren Interpretierbarkeit der Daten. Das gilt vor allem für die Landsat TM Kanäle 4 und 5.

Die nachfolgenden Histogramme des Landsat TM-Satellitenbildausschnitts vom 02.07.1991 vervollständigen die vergleichende Dokumentation der radiometrischen Eigenschaften der korrigierten Landsat TM-Daten.

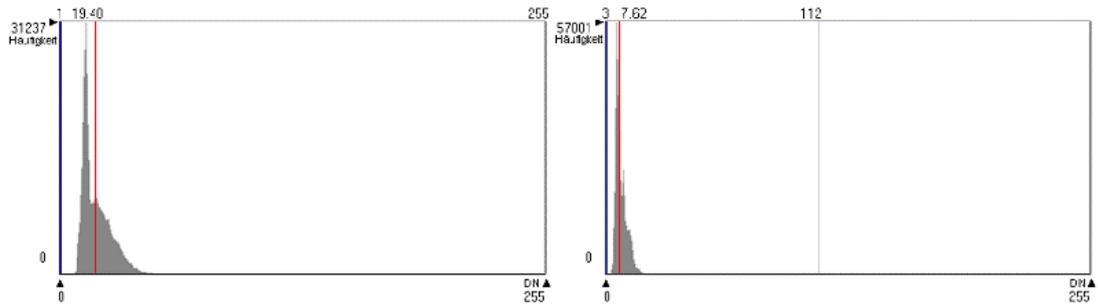
Kanal 1:



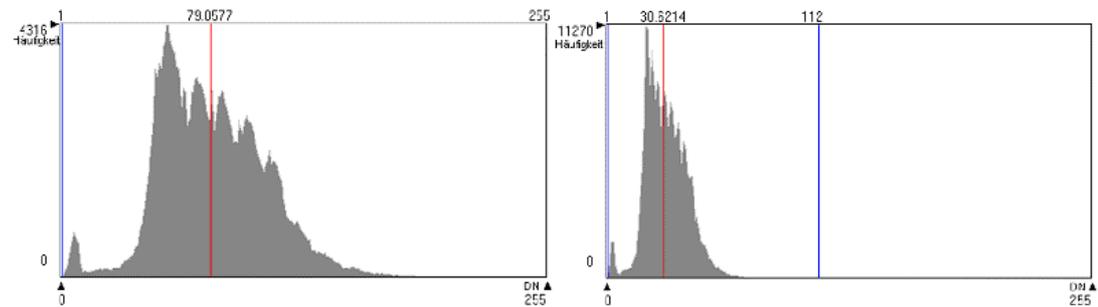
Kanal 2:



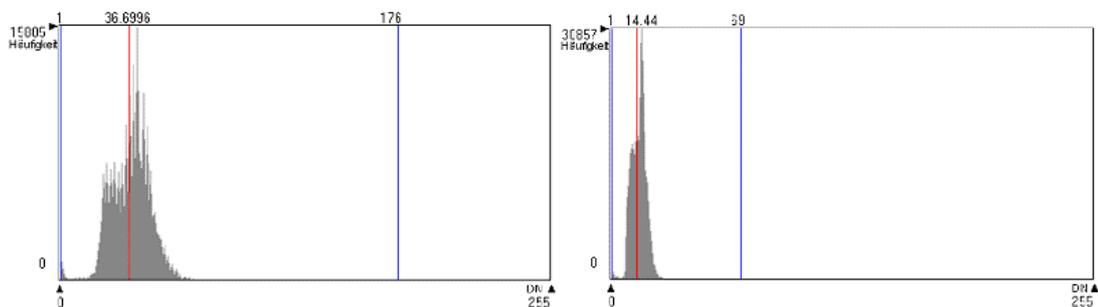
Kanal 3:



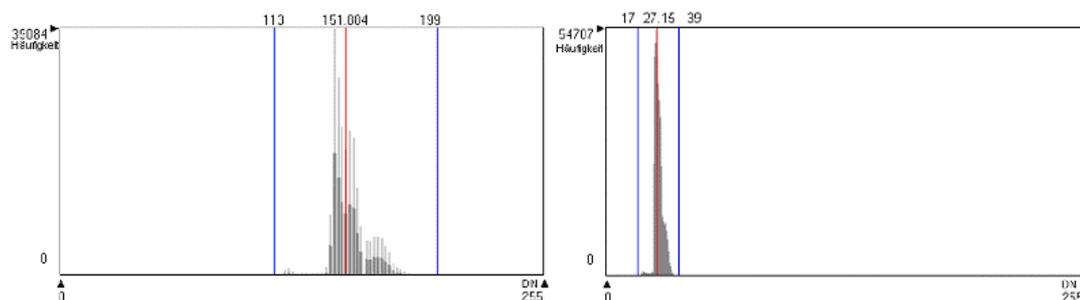
Kanal 4:



Kanal 5:



Kanal 6:



Kanal 7:

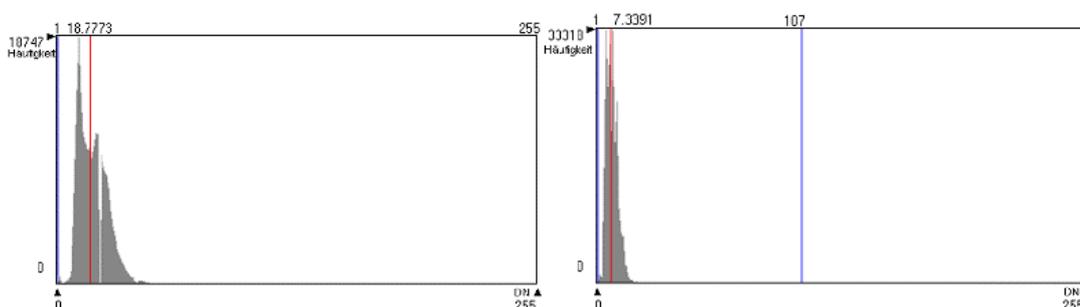


Abb. 3.23: Korrigierter Landsat TM-Satellitenbildausschnitt vom 02.07.1991: Histogramme (DNs links, Prozentwerte rechts). Quelle: ERDAS Imagine: Image Info, verändert

Im wesentlichen weisen die korrigierten Datensätze im Vergleich zueinander die gleichen Trends auf, wie die zuvor analysierten Landsat TM-Datensätze. Die korrigierten Datensätze sind dunkler, die einzelnen Objektgruppen treten durch Gipfelbildung vor allem im TM-Kanal 4 deutlicher hervor (DN-Werte) und sind besser abzugrenzen als im Histogramm des TM-Kanal 4 im Rohdatensatz (vgl. Abb. 3.24 links: unkorrigierter Kanal 4, rechts: korrigierter Kanal 4; vgl. Tab. B.5, Anhang B).

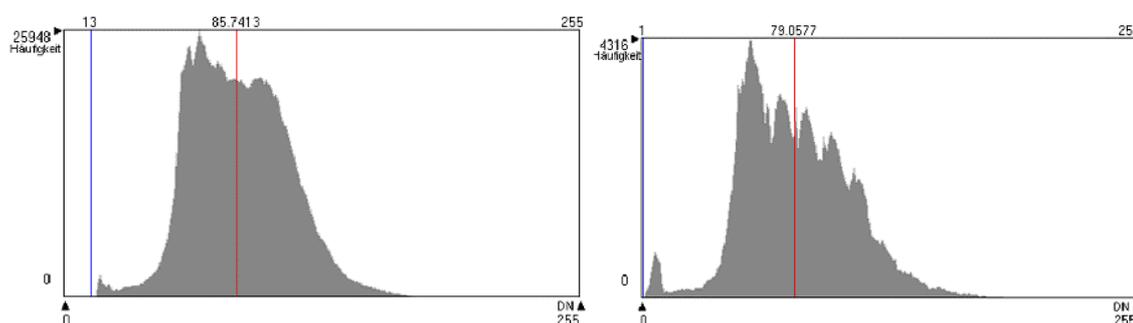


Abb. 3.24: Histogrammvergleich des TM-Kanal 4 vor und nach der Atmosphärenkorrektur der Daten. Quelle: ERDAS Imagine: Image Info, verändert

Ein Vergleich der Landsat MSS-Daten mit den Landsat TM-Daten ist nur mit Einschränkung zulässig, da MSS ein weiterer unabhängig kalibrierter Sensor ist und zudem die Kanalbreiten und die Lage der Kanäle im elektromagnetischen Spektrum von denen des Landsat TM-Sensors abweichen. Ein bedingter Vergleich der Histogramme ist für die Kanäle

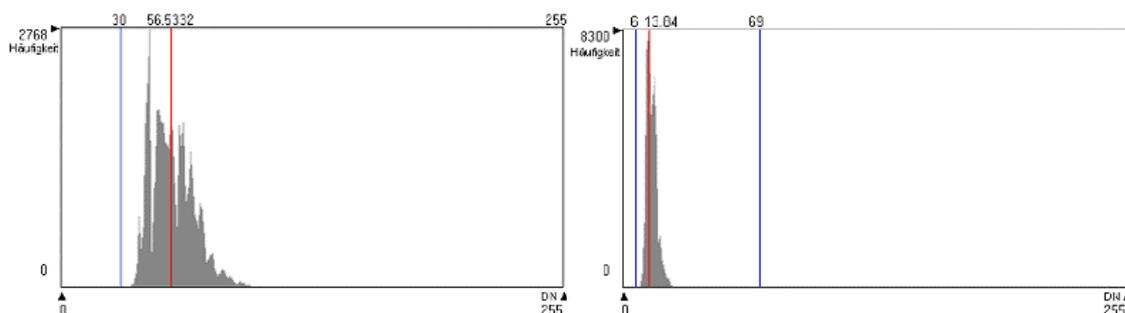
- MSS-Kanal 1 zu TM-Kanal 2,
- MSS-Kanal 2 zu TM-Kanal 3,
- MSS-Kanal 4 zu TM-Kanal 4
- der Datensätze vom 02.07.1991 möglich.

Für die genannten Kanäle ähneln sich die Histogrammkurven der beiden Sensordatensätze sowohl für die auf DN-Werte kalibrierten Histogramme als auch die die Prozentwerte abbildenden Histogramme sehr (vgl. nachfolgende Histogramme des Sensors Landsat MSS).

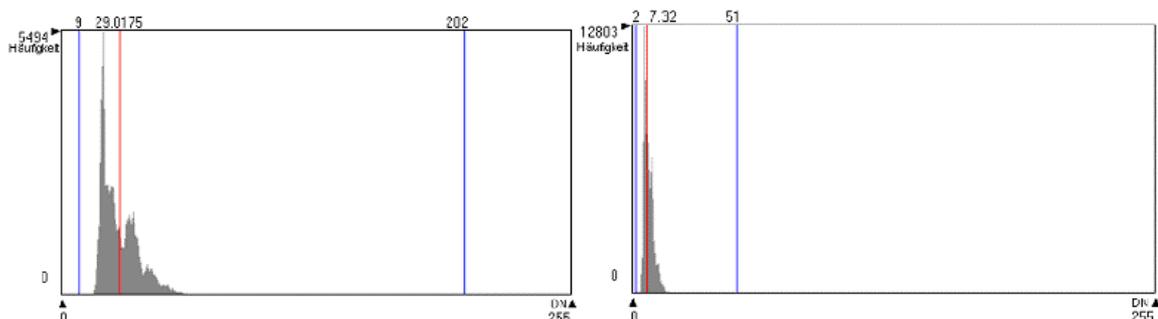
Die Kanäle des Sensors MSS sind breiter gefaßt als die des Sensors TM (vgl. Tab. A.1, Anhang A). Hieraus läßt sich ableiten, daß die Konzentrationsbereiche der MSS-Histogramme in allen Kanälen breiter ausfallen als bei den TM-Histogrammen vom 02.07.1991. Durch breiter gefaßte Kanäle wird quantitativ mehr Reflexion aufgezeichnet. Die typischen wellenlängenabhängigen Spektralsignaturen einzelner Objektgruppen gehen durch die breiteren Kanäle verloren und führen zu unruhigen Histogrammsilhouetten, in denen man einzelne Objektgruppen nicht mehr so gut isolieren kann (vgl. unten).

Insgesamt zeigen die korrigierten MSS-Datensätze vergleichbare radiometrische Charakteristiken wie die des Landsat TM-Sensors: nach der Korrektur sind beide Datensätze dunkler und der die DN-Werte abbildende Datensatz wird besser interpretierbar durch weiter gefaßte Konzentrationsbereiche der Grauwertverteilungen (vgl. Anhang B, Tab. B.6).

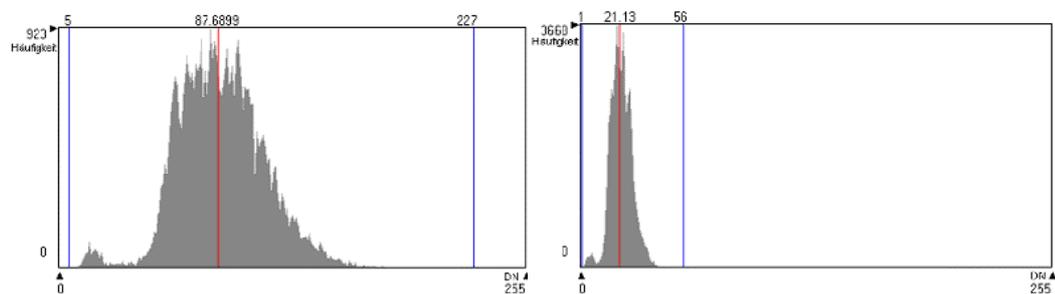
Kanal 1:



Kanal 2:



Kanal 3:



Kanal 4:

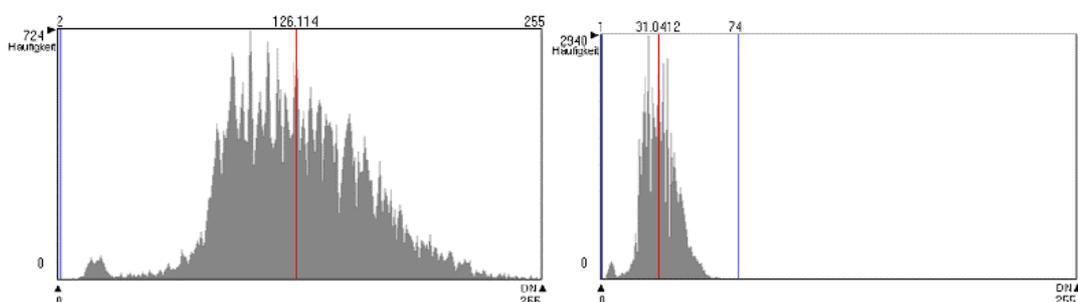


Abb. 3.25: Korrigierter Landsat MSS-Satellitenbildausschnitt v. 02.07.1991: Histogramme (DNs links, Prozentwerte rechts). Quelle: ERDAS Imagine: Image Info, verändert

Abschließend bleibt festzuhalten, daß die atmosphärenkorrigierten Daten das Reflexionsverhalten der Untersuchungsfläche zum gegebenen Aufnahmezeitpunkt realitätsnaher widerspiegeln als die Rohdatensätze (vgl. Anhang B, Tab. B.7). Die auf Prozentwerte korrigierten Datensätze geben zwar die tatsächlichen Reflexionswerte wieder und eignen sich für sensorvergleichende Analysen; Variationen sind jedoch schwer erkennbar. Im Zuge weiterführender Analysen dürfte dieser Umstand hinderlich sein, so daß im allgemeinen auf die DN-korrigierten Datensätze zurückgegriffen wird. Die zuletzt genannten Daten werden im Rahmen der folgenden Geocodierung sowie der Verbesserung der Detailschärfe in ihrer Radiometrie leicht verändert (vgl. folgendes Kapitel). Das ist jedoch im Gesamtprozeß der Datenverarbeitung und -auswertung eine Begleiterscheinung, die vernachlässigt werden kann.

Für die Bildschirmarbeit mit den Daten werden diese im weiteren Verlauf lediglich visuell z.B. über die Histogrammstreckung (i.d.R. die Methode der zweifachen STA) aufbereitet; die weiteren Analysen basieren auf den vorprozessierten Daten.

### 3.2.3 Vorprozessierung: Geocodierung und Verbesserung der Detailschärfe - theoretischer Rahmen

Die Ursachen für geometrische Fehler, die eine Georektifizierung (Beseitigung von Lageabweichungen infolge der geneigten Satellitenbahn: z.B. annähernd polarer Orbit) oder eine Geocodierung (Einpassen eines Datensatzes auf ein Koordinatensystem; vgl. u.a. KRAUS 1990, S. 422) erfordern, sind vielfältig und können wie folgt zusammengefaßt werden:

- plattformbedingte Fehlerquellen wie z.B. Satellitengeschwindigkeit, Variationen in der Flughöhe und -bahn,
- sensorbedingte Fehlerquellen wie z.B. Unregelmäßigkeiten in der Aufzeichnung, Panoramaeffekt,
- weitere Fehlerquellen wie z.B. Erdrotation, Topographie (vgl. auch MATHER 1999, S. 75 ff.; HUSAK et al. 1999, S. 1033 ff.; RICHARDS 1993, S. 48 ff.).

Weiterführende Informationen finden sich bei RICHARDS 1993, S. 48 ff., MATHER 1999, S. 28 ff., KRAUS 1990, S. 422 ff., BÄHR & VÖGTLE 1991, S. 33 ff., WIENECKE 1988, S. 20 ff.

Die benutzten Satellitenbilddatensätze werden - die oben genannten möglichen Fehlerquellen nicht weiter vertiefend, weil plattform- und sensorbedingte Fehlerquellen in der Regel durch den Hersteller vorkorrigiert sind - mit den in ERDAS Imagine 8.4 implementierten Routinen rektifiziert, geocodiert sowie die DNs bzw. Prozentwerte der Quellpixel über Transformationsgleichungen in das neue Koordinatengitter extrapoliert/übertragen („Resampling“). Wie zuvor erwähnt, ist die Geocodierung für Untersuchungen im Rahmen eines Monitorings unerlässlich, da bei fehlenden Raumkoordinaten Vergleichsanalysen zwischen den Zeitschnitten sowie mit Sekundärquellen und Kartenwerken nicht durchgeführt werden können (Kap. 3.1).

ERDAS Imagine 8.4 bietet für ausgewählte Sensoren sensorspezifische Dialogfenster im Rahmen der Geocodierung an. Die notwendigen Angaben hierfür wie z.B. Viertelszenenidentifikation sind zum Teil der „Header Information“ eines Datensatzes zu entnehmen. Die Geländehöhen werden mit Hilfe von Kartenwerken abgeglichen; sie sind im vorliegenden Fall vernachlässigbar, so daß ein Geländemodell für die Geocodierung nicht erforderlich ist. Die Geocodierung erfolgt somit auf das Gauß-Krüger-Koordinatensystem mit Hilfe zweidimensionaler Referenzpunkte (GCPs, s.u.).

Um die Vergleichbarkeit der geocodierten Datensätze weiter zu verbessern, existieren verschiedene Methoden, um die Detailschärfe von Fernerkundungsdaten zu erhöhen. Eine verbesserte Detailschärfe ist im Rahmen von Zeitreihenanalysen ein entscheidender Vorteil, da hierdurch Einzelobjekte im Bild besser ansprechbar werden und sicherer verglichen werden können. Durch eine erhöhte Detailschärfe kommt es zu einer besseren Ortstreue (ORTHABER 1999, S. 47); Details erscheinen besser sichtbar (höhere Detaillierkennbarkeit) und sind z.B. über Suchkoordinaten im Bild leichter erfaßbar (vgl. unten).

Das grundsätzliche geometrische Auflösungsvermögen eines Sensors kann dadurch aber nicht verbessert werden, da die Pixelgrößen sensorspezifisch festgelegt sind. Zudem kann der Informationsgehalt eines Pixels nicht nachträglich vermehrt werden; die impliziten Informationen eines Pixels werden weiterverarbeitet.

Da die gängigen Verfahren nicht auf spezielle Verwendungszusammenhänge festgelegt sind, muß im Einzelfall geprüft werden, welches Verfahren für diese Arbeit optimale Ergebnisse liefert. Dazu werden für diese Arbeit anhand der Kombination von SPOT PAN-Daten und Landsat TM- sowie MSS-Daten die folgenden gängigen Ansätze geprüft:

- arithmetische Verfahren: Addition, Multiplikation, Brovey-Transformation (vgl. auch POHL & VAN GENDEREN 1998, S. 823 ff.),
- Hauptkomponententransformation - inverse HKT (HKT, in Anlehnung an die englischsprachigen Abkürzungen: PCA = Principal Components Analysis, PC = Principal Component) (weiterführend hierzu: CHAVEZ et al. 1991, S. 295 ff.; POHL & VAN GENDEREN 1998, S. 823 ff.; POHL 1999, S. P 7-4-3W6),
- Farbraumtransformation vom Rot-Grün-Blau-Raum (RGB) in den Intensitäts-Farbfrequenz-Farbsättigungs-Raum (IHS) mit inverser Transformation (IHS zu RGB) (siehe auch MATHER 1999, S. 99 f.; POHL & VAN GENDEREN 1998, S. 823 ff.; CHAVEZ et al. 1991, S. 295 ff.; BÄHR & VÖGTLE 1991, S. 70 ff.; KRAUS 1990, S. 397 ff.),
- einfache Pixelvervielfachung (ORTHABER 1999, S. 47 f.).

Die **Multiplikation** und die **Addition** sind die einfachsten und schnellsten Verfahren. Jedoch führt die Multiplikation zweier Datensätze (ein geometrisch höher auflösender und ein geometrisch geringer auflösender) zu inakzeptablen Veränderungen der spektralen Eigenschaften, während die Addition nur in Kombination mit einer Pixelvervielfachung der geometrisch schlechter auflösenden Daten sinnvoll erscheint (vgl. auch POHL & VAN GENDEREN 1998, S. 834 f.).

Die **Brovey-Transformation** ist eine spezielle Kombination von arithmetischen Operationen inklusive der Ratiobildung. Die Transformation normalisiert die multispektralen Kanäle, die für die RGB-Darstellung ausgewählt werden, und multipliziert das Ergebnis mit einem geometrisch höher auflösenden Datensatz. Durch die Kontrastverstärkung der Extrembereiche der Histogramme werden Objekte, die in diesen Histogrammabschnitten abgebildet sind, besser visuell ansprechbar und differenzierbar (Schattenbereiche, Wasserflächen; vgl. POHL 1999, S. P 7-4-3W6). Durch die Formel werden jedoch die ursprünglichen spektralen Informationen derart verändert, daß weiterführende Spektralanalysen z.B. im Rahmen einer multispektralen Klassifizierung nicht mehr möglich sind (ERDAS Imagine 8.4 online documentation 2000). Selbst für Anschauungs- oder Präsentationszwecke ist das Ergebnisbild aufgrund der veränderten Eigenschaften kaum brauchbar.

Ein weiteres bekanntes Manipulationsverfahren zur Verbesserung der Detailschärfe ist die **inverse HKT** (vgl. auch CHAVEZ et al. 1991, S. 295 ff.; POHL & VAN GENDEREN 1998, S. 835 f.; POHL 1999, S. P 7-4-3W6; ERDAS Imagine 8.4 online documentation 2000).

Der betroffene Datensatz, z.B. Landsat TM, wird zunächst mit Hilfe der HKT transformiert. In einem weiteren Schritt wird die 1. HK (Hauptkomponente) durch ein geometrisch höherauflösendes Satellitenbild (ein Kanal), z.B. SPOT PAN ersetzt. Zuvor wurde der Landsat TM-Datensatz auf den SPOT PAN-Datensatz rektifiziert.

Nach dem Austausch der 1. HK durch das PAN-Bild erfolgt mit diesem Datensatz eine inverse HKT. Das ursprüngliche Ziel der inversen HKT ist die Rücktransformation der spektralen Information eines Datensatzes in ihren Ausgangszustand. Wäre die 1. HK nicht ausgetauscht worden, so wäre der Datensatz in seinen spektralen Eigenschaften mit denen des Ausgangsdatsatzes identisch.

Durch den Austausch verliert der neue Datensatz aber seine ursprünglichen radiometrischen und spektralen Eigenschaften. Auch wenn diese Veränderungen nicht so umfassend sind, wie z.B. bei der Brovey-Transformation, sind die Daten für weitere Spektralanalysen unbrauchbar). Der einzige Vorteil der inversen HKT besteht darin, daß das Verfahren auf einen gesamten Datensatz auch mit mehr als drei Kanälen anwendbar ist, während die Brovey-Transformation sowie die inverse Farbraumtransformation nur drei ausgewählte Kanäle berücksichtigen.

Das Verfahren der ***inversen Farbraumtransformation*** gliedert sich ähnlich wie die inverse HKT in zwei Schritte:

1. Nachdem der zu verbessernde Datensatz auf den geometrisch höherauflösenden Datensatz rektifiziert worden ist, wird er vom RGB-Farbraum in den IHS-Farbraum transformiert. Hierbei werden die Farbanteile von Rot, Grün und Blau in der Skalierung des IHS-Raums nach ihren Anteilen in den Pixeln am Intensitätswert, an dem Farbfrequenzwert und am Farbsättigungswert transformiert (weiterführend hierzu: MATHER 1999, S. 98 f.; POHL & VAN GENDEREN 1998, S. 832 f.; HILDEBRANDT 1996, S. 510; GONZALEZ & WOODS 1993, S. 229 ff.; CHAVEZ et al. 1991, S. 295; BÄHR & VÖGTLE 1991, S. 148 f.; KRAUS 1990, S. 397 ff.; CARPER et al. 1990, S. 459 ff.).
2. Der Intensitätskanal wird durch den geometrisch höher auflösenden Kanal ersetzt, bevor die inverse Transformation durchgeführt wird. Zusätzlich erfährt dabei der neue Kanal eine Kontrastverstärkung, um die „Intensität“ des Resultats zu optimieren. Da auch hier „fremde“ Daten rücktransformiert werden, zerstört dies die ursprünglichen radiometrischen Eigenschaften.

Allerdings ist das Ergebnisbild des Testlaufs recht eindrucksvoll, da die Detailerkennbarkeit enorm verbessert ist und zudem die Transformation zu einer dem menschlichen Auge gefälligen, gesättigten Farbgebung führt. Eventuell läßt sich diese Darstellung im Rahmen von Präsentationsaufgaben nutzen (z.B. Bürgerversammlungen).

Zur Optimierung der Vergleichsanalysen durch möglichst genaue Lageeinpassung von Objekten oder Flächen bleibt als letzte gängige Variante, die ***Pixelvervielfachung*** zu prüfen. Bei diesem Verfahren wird im Zuge des „Resamplings“ die Pixelgröße benutzerorientiert entgegen der sensorspezifischen Pixelgröße (Landsat-TM: 30 m Pixelkantenlänge) z.B. auf 10 m Pixelkantenlänge herabgesetzt. Diese Vorgehensweise spart einen „Resampling“-Prozess; die

spektralen Eigenschaften des Datensatzes werden dadurch besser erhalten, als durch das übliche zweischrittige Verfahren (ORTHABER 1999, S. 7 f.). Als „Resampling“-Verfahren empfiehlt ORTHABER (1999, S. 47) die „Bilineare Interpolation“ (vgl. Anhang B, Abb. B.2). Hierüber werden die Grauwerte der benachbarten vier Pixel des Ursprungsbildes für die Generierung/Extrapolation („Resampling“) eines neuen Pixelgrauwertes für das geocodierte Bild herangezogen. Einerseits führt dies zu Veränderungen der spektralen Eigenschaften des gesamten neuen Bildes, da neue Grauwerte entstehen; andererseits fließt über die Interpolation die Umgebungsinformation, die in den Grauwerten der Nachbarpixel enthalten ist, in die Extrapolation mit ein. Folglich entsteht bei dem Verfahren der Pixelvervielfachung (also zeitgleiches Heruntersetzen der Pixelgröße bei gleichbleibender Bildgröße im Zuge des „Resamplings“) über die „Bilineare Interpolation“ ein neuer Pixelgrauwert, der - etwas unscharf formuliert - „realitätsnäher“ ist als z.B. ein über das Verfahren des „Nächsten Nachbarn“ bei gleichbleibender Pixelgröße generiertes Ausgabepixel (30 m x 30 m z.B.; vgl. Abb. 3.26: schematisiertes Beispiel des Landsat TM Kanals 4). Zudem wird z.B. durch GÖPFERT (1987, S. 145) oder KRAUS (1990, S. 424) bemängelt, daß im Rahmen des Verfahrens „Nächster Nachbar“ die neu generierten Bildelemente bis zu einem halben Pixel verschoben werden.

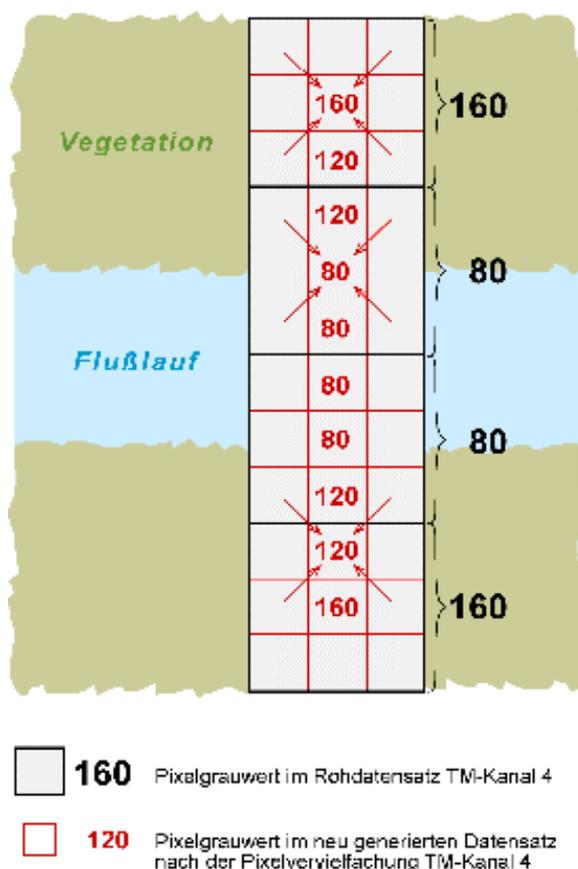


Abb. 3.26: Vereinfachte schematische Darstellung des Effekts der Pixelvervielfachung

Dieser Effekt erhöht die Detaillierbarkeit im gesamten Bild dadurch, daß die Umgebung jedes Ursprungspixels die Grauwertbildung des Ausgabepixels beeinflusst (Ausnahme: Rand-

pixel). Damit werden gleitende Übergänge geschaffen (Abb. 3.26: DNs 160-120-80). Objekte bzw. deren Konturen werden erhalten oder wiederhergestellt, so daß der Betrachter Zusammenhänge besser erfassen kann. Im Vergleich dazu droht ein Bild, das mit der Methode des „Nächsten Nachbarn“ generiert wird, in die Pixelstruktur zu zerfallen, Objekte können als Sinneinheiten nicht mehr erkannt werden.

Zudem wird mit dem Verfahren der Pixelvervielfachung eine bessere Lagegenauigkeit bzw. Ortstreue von Objekten erreicht (vgl. Abb. 3.26: Breite des Flußlaufs vor und nach der Pixelvervielfachung repräsentiert durch Pixel mit dem DN-Wert 80). Die Mischpixelproblematik, die gemischte Reflexion je Pixel in Abhängigkeit von der Größe und Anzahl der Objekte je Pixel, wird reduziert, weil die Pixel

1. kleiner sind und
2. die kleineren Pixel eine „realitätsnähere“ Grauwertinformation enthalten ( vgl. Abb. 3.26, 3.27):

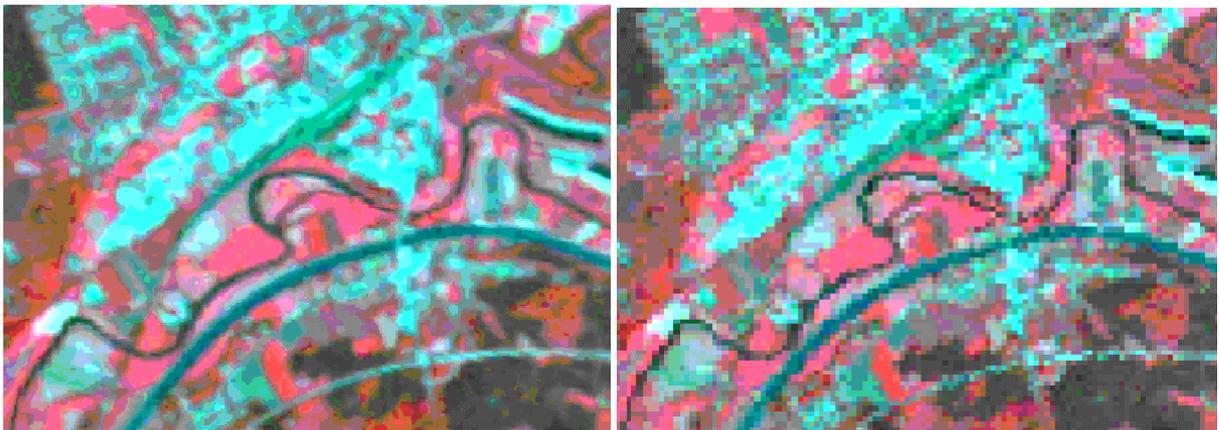


Abb. 3.27: Vergleich der Detailschärfe: links Pixelvervielfachung mit 10 m Pixelkantenlänge (Bilineare Interpolation) - rechts nominelle Pixelkantenlänge von 30 m (Nächster Nachbar; screenshots)

Die Tabelle 3.5 gewährt einen zusammenfassenden vergleichenden Überblick der vorgestellten Verfahren.

Das Verfahren der einfachen Pixelvervielfachung ist im Modul „geometric correction“ in ERDAS Imagine sehr einfach und schnell durchzuführen. Abbildung 3.28 zeigt die Einstellungen im Dialogfenster; die Pixelgröße des Ergebnisbildes wird auf 10 m festgesetzt.

Tab. 3.5: Vergleich der untersuchten Verfahren zur Verbesserung der Detailschärfe geocodierter Fernerkundungsdatensätze

Verfahren	Literatordokumentation	wesentliche Verfahrensschritte	Schwächen/Nachteile	Praktikabilität/ Vorteile
arithmetische Verfahren: Addition, Multiplikation	POHL & VAN GENDEREN 1998	<ul style="list-style-type: none"> <li>Addition, Multiplikation zweier Datensätze (auch multispektral), einer geom. höher auflösend, einer geringer auflösend</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>bei geom. Paßungenauigkeiten: Referenzierung des zu bearbeitenden Datensatzes auf den Referenzdatensatz</li> <li>inakzeptable Veränderungen der spektralen Eigenschaften des neu generierten Datensatzes</li> <li>Datensatz kann nicht mehr spektral analysiert werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nicht empfehlenswert</li> </ul>
arithmetische Verfahren: Brovey-Transformation	POHL & VAN GENDEREN 1998	<ul style="list-style-type: none"> <li>Kombination arithmetischer Operationen inklusive Ratiobildung zweier Datensätze</li> <li>die Multispektralkanäle werden normalisiert und die Extrembereiche der Histogramme kontrastverstärkt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>bei geom. Paßungenauigkeiten: Referenzierung des zu bearbeitenden Datensatzes auf den Referenzdatensatz</li> <li>die Spektraleigenschaften des neuen Datensatzes sind derart verändert, daß weitere Spektralanalysen nicht durchführbar sind</li> <li>nur drei Kanäle können transformiert werden</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nicht empfehlenswert</li> </ul>
inverse HKT	CHAVEZ et al. 1991 POHL & VAN GENDEREN 1998 POHL 1999	<ul style="list-style-type: none"> <li>HKT wird für den zu verbessernden Datensatz durchgeführt</li> <li>die 1. HK wird dann durch den einkanaligen geom. höher auflösenden Datensatz ersetzt</li> <li>die inverse HKT wird mit dem neuen Datensatz durchgeführt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>bei geom. Paßungenauigkeiten: Referenzierung des zu bearbeitenden Datensatzes auf den Referenzdatensatz</li> <li>durch den Austausch der 1. HK werden die Spektraleigenschaften so verändert, daß Spektralanalysen z.B. für konventionelle Klassifikationen nicht mehr durchführbar sind</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>nicht empfehlenswert, allerdings können Datensätze auch mit mehr als drei Kanälen verarbeitet werden</li> </ul>
inverse Farbraumtransformation	KRAUS 1990 BÄHR & VÖGTLE 1991 CHAVEZ et al. 1991 POHL & VAN GENDEREN 1998 MATHER 1999	<ul style="list-style-type: none"> <li>Transformation des zu verbessernden Datensatzes in den IHS-Farbraum</li> <li>der Intensitätskanal wird durch den geom. höher auflösenden Kanal ersetzt, der neue Kanal wird zusätzlich kontrastverstärkt</li> <li>Rücktransformation in den RGB-Farbraum</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>bei geom. Paßungenauigkeiten: Referenzierung des zu bearbeitenden Datensatzes auf den Referenzdatensatz</li> <li>nur drei Kanäle können transformiert werden</li> <li>die Spektraleigenschaften des Datensatzes sind zerstört, Spektralanalysen sind nicht mehr möglich</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>für Spektralanalysen nicht empfehlenswert</li> <li>für Präsentationszwecke z.B. als Basiskarte sehr eindrucksvoll</li> </ul>
einfache Pixelvervielfachung	ORTHABER 1999	<ul style="list-style-type: none"> <li>im Zuge der Geocodierung wird die Pixelgröße herabgesetzt (z.B. von 30 m auf 10 m Kantenlänge)</li> <li>als Resampling-Verfahren wird die Bilineare Interpolation gewählt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>die originären DN's werden verändert</li> <li>das Verfahren hat zudem glättende Wirkung auf die DN's</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>verbesserte Ortstreue</li> <li>verbesserte Detailerkennbarkeit</li> <li>die Veränderungen der Spektraleigenschaften sind akzeptabel, Spektralanalysen können weiter durchgeführt werden</li> <li>leicht und schnell anzuwenden ohne Referenzierung auf einen weiteren Datensatz</li> </ul>

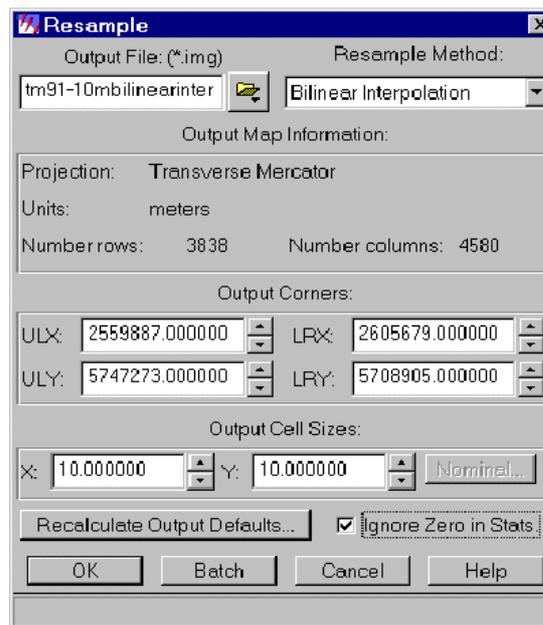


Abb. 3.28: Einstellungen für die einfache Pixelvervielfachung im Rahmen der Geocodierung in ERDAS Imagine (screenshot)

Aufgrund der vorgenannten Nach- und Vorteile der einzelnen Verfahren wird das Verfahren der einfachen Pixelvervielfachung für diese Arbeit gewählt. Die Vorteile der verbesserten Detailschärfe und der erhöhten Detailerkennbarkeit sind bestechend. Außerdem können die Daten im Zuge der wissensbasierten Klassifizierung einer Spektralanalyse unterzogen werden; dies ist für alle anderen Verfahren nicht der Fall. Falls Satellitenbildszenen verschiedener Zeitschnitte trotz dieser Manipulation mangelhafte räumliche Übereinstimmungen zeigen, ist gegebenenfalls die Rektifizierung eines oder mehrerer Bilder auf ein Referenzbild sinnvoll.

### 3.2.4 Vorprozessierung: Durchführung der Geocodierung und Verbesserung der Detailschärfe der benutzten Satellitenbilddaten

Zunächst werden die Satellitenbildszenen einzeln bearbeitet. Das heißt, daß jede Szene geocodiert und die Detailschärfe verbessert wird. Danach wird die räumliche Übereinstimmung zwischen den Szenen geprüft. Wenn die Übereinstimmung nicht zufriedenstellend ist, erfolgt in einem neuen Ansatz die Rektifizierung eines oder mehrerer Bilder auf ein Referenzbild.

Diese Vorgehensweise schützt zunächst vor systematischen Fehlern, die auftreten können, wenn verschiedene Bilder auf ein Referenzbild eingepaßt werden. Da ein geocodiertes Satellitenbild stets leichte Lagefehler im Vergleich zum Referenzkoordinatensystem aufweist, verfügt auch ein Referenzbild über diese Lageungenauigkeiten (vgl. unten: RMS-Fehler). Bei der Rektifizierung von Satellitenbildszenen auf ein mit Lagefehlern behaftetes Referenzbild

können systematische Fehler weitergegeben werden und zusätzlich neue Ungenauigkeiten auftreten. Aus diesem Grund wird das beschriebene Verfahren durchgeführt.

Dabei sind folgende Punkte zu beachten:

- Voraussetzung ist, daß genügend Paßpunkte gleichmäßig über das Bild verteilt ausgewählt werden (Anzahl ist abhängig von der Szenengröße und geometrischen Auflösung des Fernerkundungsdatensatzes, s.u.). Dadurch können Ungenauigkeiten, die durch die Topographie entstehen können, ausgeglichen werden. Die Paßpunkte sollten an deutlich erkennbaren topographischen Punkten liegen und möglichst invariant sein. Das heißt, daß Eckpunkte von bestellten Äckern sich als Paßpunkt nicht eignen, während Wegkreuzungen im allgemeinen gut geeignet sind.
- Mit Hilfe des Moduls „geometric correction“ in ERDAS Imagine erfolgt die Paßpunktwahl, die Berechnung der Lagegenauigkeit der Punkte sowie das „Resampling“ und die Geocodierung des Datensatzes wie folgt:
  - (1) Im Satellitenbildausschnitt werden gut erkennbare und gleichmäßig im Gelände verteilte Paßpunkte identifiziert. Für die einzelnen Satellitenbilddatensätze werden zwischen 6-10 „Ground Control Points“ (GCPs), Paßpunkte, in dem Untersuchungs-gelände gewählt.
  - (2) Sie werden dann in der digitalen TOP-NRW 50, der Topographischen Karte für Nordrhein-Westfalen im Maßstab 1:50.000 (LVA NRW 1997), ebenfalls identifiziert, und die jeweiligen Koordinatenwerte der Punkte werden notiert.
  - (3) Diese Koordinatenwerte werden über die Tastatur in das Modul eingegeben.
  - (4) Die dazugehörigen Paßpunkte werden im Satellitenbild markiert.
  - (5) Danach wird der RMS-Fehler für die erwarteten Koordinaten der Paßpunkte im neu zu generierenden Bild berechnet. Dies geschieht punktorientiert.
  - (6) Über iteratives Ausscheiden von Paßpunkten mit hohen Abweichungen in der x- oder y-Koordinate sowie über die mögliche Verbesserung der Paßpunktlage im Satellitenbild werden die RMS-Fehler für die x- und y-Koordinatenwerte und der gesamte RMS-Fehler sukzessive verkleinert und die erwartete Paßgenauigkeit verbessert. Die Gesamt-„Root Mean Square Errors“ (RMS-Fehler je Datensatz) als Maßzahlen zur Einschätzung der Genauigkeit der Geocodierung bewegen sich zwischen 0,3 bis 0,5 Pixeln; je nach Bodenauflösungsvermögen des Sensors bedeutet das Fehler von circa 26-40 m (MSS), 10-15 m (TM) und 3 m für SPOT PAN. In der Fachliteratur wird ein RMS-Fehler von 0,5 bis maximal 1 Pixel als vertretbar erachtet; die erreichten RMS-Fehler sind folglich sehr gute Ergebnisse (dies wird untermauert durch LILLESAND & KIEFER 1994, S. 621; ERDAS INC. 1999, S. 364; weiterführend hierzu: WELCH et al. 1985, S. 52 ff.; FORD & ZANELLI 1985, S. 35 ff.).

Wenn der gesamte RMS-Fehler die oben genannten Grenzwerte erreicht bzw. unterschreitet, werden die Datensätze zunächst mit dem „Resampling“-Verfahren „Nächster Nachbar“ als geocodierte Satellitenbildausschnitte generiert (vgl. Abb. B.1, Anhang B). Diese Datensätze sind relativ klein (ca. 22 MB) und für schnelle vergleichende Übersichtsanalysen geeignet.

Darüber hinaus werden die Landsat-TM- und MSS-Datensätze im Zuge der angestrebten Verbesserung der Detailschärfe mit einer Pixelkantenlänge von 10 m und dem „Resampling“-Verfahren „Bilineare Interpolation“ geocodiert (s.o.). Diese Datensätze sind sehr viel größer (ca. 120 MB) und eignen sich trotz der leicht veränderten radiometrischen Eigenschaften für weitere Spektralanalysen gut.

Um die Daten künftig effizient be- und verarbeiten zu können, werden sie im letzten Vorverarbeitungsschritt auf die relevanten Kanalkombinationen reduziert. Für die weiteren Analysen sind vor allem die TM-Kanäle 3, 4 und 5 sowie die MSS-Kanäle 2, 3 und 4 wichtig, da hierüber die Indizes berechnet werden. Außerdem dienen die objektgebundenen Reflexionswerte in diesen Kanälen im Rahmen der wissensbasierten Klassifizierung der Isolation von Klassen, da die Werte als Eingangsvariablen zur Charakterisierung einzelner Klassen benutzt werden. Die TM-Kanäle 2 und 7 sowie der MSS-Kanal 1 hingegen dienen als zusätzliche Informationsquellen im Zuge der wissensbasierten Klassifikation.

Folglich bleiben der SPOT PAN- und der MSS-Datensatz unverändert, während die Landsat TM-Datensätze auf die Kanäle 2, 3, 4, 5 und 7 reduziert werden. Schließlich stehen die Datensätze für weiterführende Analysen zur Verfügung.

## 4 Analyse der Daten

### 4.1 Analyse der Kollateralquellen

Da die thematischen und topographischen Karten und Kartenwerke sukzessive im Rahmen der Analyse der Fernerkundungsdaten ausgewertet werden, sind gesonderte Untersuchungen und Bewertungen der Daten nicht vorgesehen.

Die meteorologischen und phänologischen Daten des DWD hingegen werden im Vorfeld der Auswertung der Fernerkundungsdaten analysiert. Dies ist notwendig, um die Repräsentativität und Aussagekraft der Ergebnisse (v.a. Vegetationsindizes s.u.) besser einschätzen zu können.

Für die Station Herten (früher Recklinghausen) als nächstgelegene Station zu dem Untersuchungsgebiet stehen Daten zu Monatsmitteln der Temperaturen (°C) und der Niederschläge (mm) aus den Jahren 1955-1997 zur Verfügung. Für die Jahre 1974 und 1975 liegen keine Temperaturmessungen vor. Die Analyse der Daten konzentriert sich sowohl auf die Jahre als auch auf die Monate, in denen Fernerkundungsdaten aufgezeichnet wurden (Mai, Juli für 1985, 1986, 1990, 1991).

Im Vergleich der vier Jahre ist das Jahr 1990 insgesamt das wärmste, während 1985 das kälteste Jahr ist. Dieser Trend setzt sich für die durchschnittlichen Monatstemperaturen des Mai fort. Allerdings fällt der Temperaturmittelwert für Juli 1990 mit 17,3 °C hinter 17,7 °C (1985), 17,7°C (1986) und 19,9 °C (1991) zurück (Tab. A.11, Diagr. A.1, A.3, A.4, Anhang A). Insgesamt erweisen sich die ersten Jahreshälften der Jahre 1990 (Mittel: 10,1 °C) und 1991 (Mittel 7,5 °C), die für das Einsetzen und Fortschreiten der phänologischen Entwicklungsstadien entscheidend sind, im Vergleich zu 1985 und 1986 als deutlich wärmer (Tab. A.11, Anhang A).

Vergleichend dazu verteilen sich die Jahresmittelwerte der Niederschläge von 1985, 1986, 1990 und 1991 anders: während 1986 - auch für die erste Jahreshälfte - die höchsten Mittelwerte aufweist (83 mm), ist 1991 im Gesamtvergleich der vier Jahre das trockenste Jahr (41,7 mm). Dies gilt auch für den Vergleich der Niederschlagsmengen der ersten Jahreshälften.

Im Gesamtvergleich der vier Jahre ist - wie oben bereits erwähnt - das Jahr 1985 das kälteste Jahr. Allerdings liegen die Niederschlagsmengen auf Platz drei. 1986 hingegen ist das niederschlagsreichste Jahr, während der Temperaturmittelwert an vorletzter Stelle der vier Jahre rangiert. 1990 ist das wärmste Jahr und liegt mit einem Niederschlagsmittel von 69,6 mm (erste Jahreshälfte: 65 mm/Monat) an zweiter Stelle der Niederschlagswerte. Das Jahr 1991 ist das trockenste der Jahre (auch in der ersten Jahreshälfte) (vgl. Tab. A.11, A.12, Diagr. A.1, A.2, Anhang A).

Um den Prozeß der phänologischen Entwicklung für diese Jahre einschätzen zu können, werden das Einsetzen der Blattverfärbung ausgewählter Baumarten wie Roßkastanie, Rotbuche, Stieleiche und Hängebirke sowie das Einsetzen der Gelbreife und der Beginn der Ernte von Wintergerste, -roggen und -weizen vergleichend ausgewertet. Weitere Beobachtungswerte,

z.B. für die Phasen des Austriebs, der Blattentfaltung, des Auflaufens oder des Schossens, liegen für die genannten Jahre für das Untersuchungsareal leider nicht kontinuierlich vor.

Die phänologischen Entwicklungsphasen werden durch verschiedene Parameter wie Mikroklima, Makroklima, Düngung, Bodenqualität und -durchlüftung, Niederschlagsmengen, Temperaturverteilung etc. beeinflusst. Obwohl für eine vergleichende Analyse nur zwei Parameter, Niederschlag und Temperatur, zur Verfügung stehen, zeichnen die Diagramme A.5 und A.6 (Anhang A) deutlich den Trend der Niederschlagsmengen und Temperaturverteilungen nach.

In 1985 (kältestes Jahr) setzen Gelbreife und Ernte der Getreidearten (ab 07.07) sehr viel später ein, als im wärmsten Jahr 1990 (ab 12.06). Die Blattverfärbung allerdings beginnt für dieses Jahr in der Mehrzahl der Baumarten sehr früh (ab 22.09; u.a. bedingt durch Temperaturverlauf und Niederschlagsverteilung in der zweiten Jahreshälfte: Tab. A.15, A.16, Anhang A). Die günstigen Bedingungen für die Vegetationsentwicklung im Jahr 1990 spiegeln sich ebenfalls in den Eintrittsdaten der Phasen für die Getreide und die Baumarten wider. Die relative Trockenheit der ersten Jahreshälfte 1991 hingegen scheint die Entwicklung zu verzögern und zu relativ späten Zeitpunkten der Gelbreife (ab 04.07), Ernte (ab 17.07) und Blattverfärbung zu führen (ab 05.10; vgl. Diagr. A.5, A.6, Anhang A).

Insgesamt ist daraus abzuleiten, daß die phänologischen Entwicklungsstadien der Vegetation - trotz der Streubreiten der Daten - zu den einzelnen Aufnahmezeitpunkten der Fernerkundungsdaten durchaus als normal zu bezeichnen sind. Entsprechend sind in den Luft- und vor allem in den Satellitenbildern (NIR, MIR, s.u.) keine ungewöhnlichen Zustände der Vegetation zu erwarten. Folglich wird im allgemeinen kein außergewöhnliches Reflexionsverhalten der Vegetation (wie z.B. nach einem Waldbrand) auftreten. Damit kann die Vegetation im Zuge der Analyse der Fernerkundungsdaten als verlässlicher Indikator genutzt werden, da Abweichungen von der „Normalität“ veränderte Umwelt- und Lebensbedingungen der Pflanzen indizieren (vgl. auch STEINER 1961, S. 17 ff.; DÖRFEL 1978, S. 1611 ff.; HILDEBRANDT 1996, S. 45 f.; vgl. u.).

Schließlich bleibt anzumerken, daß erwartungsgemäß an keinem Tag der Aufzeichnungen Niederschläge gefallen sind, die das Reflexionsverhalten von Böden, Versiegelung, Vegetation etc. beeinflussen können. Allerdings sollte angemerkt werden, daß sowohl am Vortag der Aufnahme vom 24.07.1985 und vom 02.07.1991 geringe Niederschlagsmengen registriert wurden (DWD Essen 1985, 1986, 1990, 1991). Das kann im allgemeinen - je nach Menge und Zeitpunkt der Niederschläge - zu veränderten Reflexionen von Objektoberflächen führen (z.B. Bebauung, kahler Untergrund). Da die Niederschlagsmengen jedoch gering sind, ist ihr Einfluß auf das Reflexionsverhalten wohl zu vernachlässigen.

## 4.2 Analyse der Fernerkundungsdaten

Die vorprozessierten Fernerkundungsdaten (vgl. Kap. 3) werden Analysen unterzogen, die im folgenden vorgestellt werden:

1. Die Vegetation wird als medienübergreifender, integraler Indikator im Rahmen der Auswertung von Fernerkundungsdaten entwickelt und für die Klassifikationen verwendet (vgl. Kap. 1.3).
2. Für die erfolgreiche Anwendung des wissensbasierten Klassifikators muß auf zusätzliche Informationsquellen zurückgegriffen werden:
  - Vegetationsindexbilder; ergänzend dazu das Rot-Grün-Indexbild für das Luftbildmosaik von 1990 (einkanalige Bilddatensätze für alle Aufnahmezeitpunkte),
  - Landnutzungs- bzw. Landbedeckungsstrukturen werden aus DGK5-Datensätzen für das Gebiet der Luftbildmosaik abgeleitet,
  - Landnutzungs- bzw. Landbedeckungsstrukturen werden für ein Teilgebiet der Satellitenbilddatensätze aus ATKIS-Daten für die Satellitenbildanalyse gewonnen (vgl. Kap. 2.1 Abb. 2.2).
3. Der wissensbasierte Klassifikator („knowledge classifier“), der in ERDAS Imagine 8.4 implementiert ist, wird vorgestellt und angewandt. Ein Vergleich mit anderen Klassifikationsansätzen wird exemplarisch durchgeführt.
4. Fernerkundliche Techniken zur Analyse von Veränderungen („change detection analysis“) der Landbedeckungen in den Luftbildzeitschnitten von 1985 und 1990 sowie in den Satellitenbildzeitschnitten von 1986 und 1991 werden geprüft und eingesetzt.

Für viele der oben genannten Analyseverfahren wie

- die optimale Auswahl und Nutzung von Indizes für das Untersuchungsgebiet,
- die Anwendung des Rot-Grün-Indexes,
- das Design und die Nutzung des wissensbasierten Klassifikators sowie
- die Techniken der Veränderungsanalysen

gibt es keine Routineanwendungen. Diese Verfahren und Techniken werden in der Regel auf spezielle Fragestellungen abgestimmt oder beispielhaft bzw. oberflächlich allgemeingültig angewandt; nutzbare Routineanwendungen sind selten oder nicht vorhanden.

In dieser Arbeit werden - natürlich auf das Untersuchungsgebiet bezogen (vgl. Kriterien für den Untersuchungsraum Kap. 2.1) - jedoch bekannte Verfahren und Techniken genutzt, modifiziert, miteinander kombiniert und Lösungsmöglichkeiten für häufig auftretende Probleme vorgestellt (Stichwort Emergenz). Damit werden die eingesetzten Methoden duplizier- und transferierbar; Handlungsanweisungen zur Analyse von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringaufgaben werden somit entwickelt. Abbildung 4.1 verdeutlicht, zu welchem Zeitpunkt diese Arbeiten im Rahmen des fernerkundlichen Umweltmonitorings durchgeführt werden.

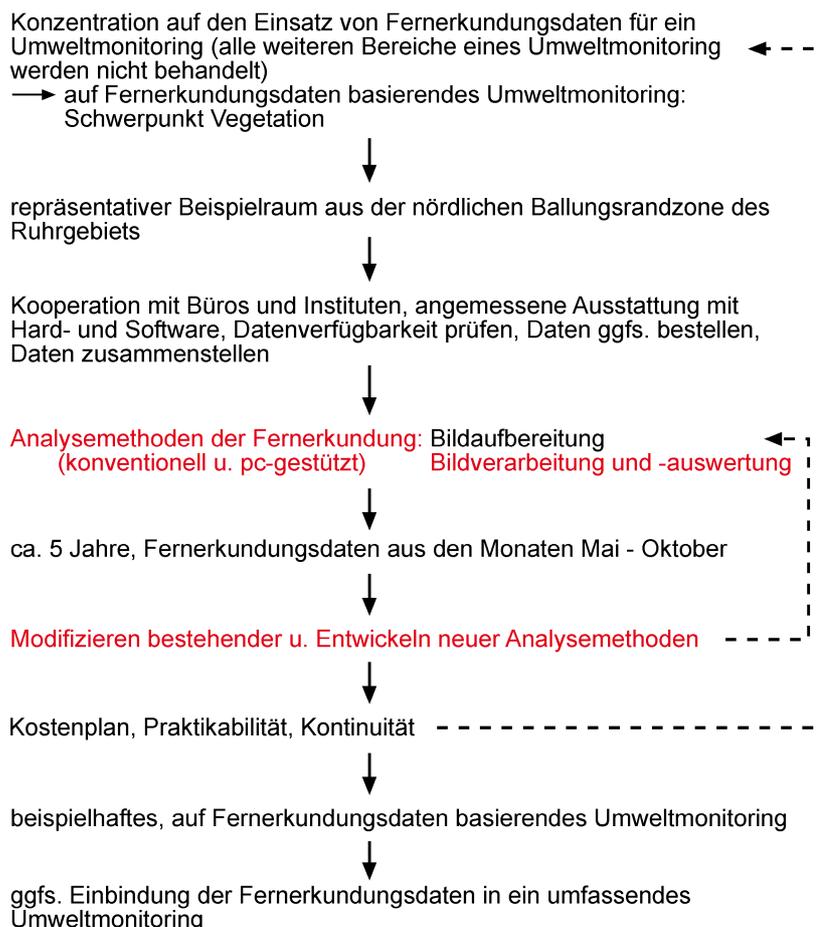


Abb. 4.1: Beispielhaftes Organigramm für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringprogramme

### 4.2.1 Vegetation als Indikator

Der Gedanke, die *Vegetation als Indikator* zu entwickeln, leitet sich für die vorliegende Studie aus dem Verständnis des Indikatoransatzes für Monitoringaufgaben in der Landschaftsökologie einerseits und der Auffassung des Indikatoransatzes in der Fernerkundung andererseits ab. Als Ergebnis wird die Vegetation als Indikator für landschaftsökologische Fragestellungen im Rahmen von Umweltmonitoringverfahren einsetzbar sein; das Verständnis und die Definition dieses Indikators wird jedoch von den Ansätzen der Landschaftsökologie erheblich abweichen. Es handelt sich um eine Modifikation und Spezialisierung des Indikatoransatzes in der Fernerkundung.

Für verschiedene landschaftsökologisch orientierte Umweltmonitoringaufgaben sind Indikatoransätze Routinemethoden. In der Regel wird dabei sektoral gearbeitet (Boden, Wasser, Luft etc.). Indikatoransätze dieser Art sollten sich - hierarchisch gegliedert bzw. akkumuliert - in einem Umweltmonitoringverfahren zusammenfassen lassen (Kritik des SRU 1991 am sektoralen Ansatz, vgl. Kap. 1.2).

In der Landschaftsökologie ist die folgende Definition des Begriffs Indikator anerkannt: er ist eine „aussagekräftige Leitgröße für ein kompliziertes Beziehungsgefüge von Ökosystemen und Landschaften, die das Gesamtsystem hinreichend genau charakterisieren ... Indikatoren sind vergleichsweise leicht erfaßbar und besitzen überdurchschnittlichen Erklärungsgehalt“ (BASTIAN & SCHREIBER 1994, S. 52, 53). Dabei handelt es sich immer um einen Kompromiß zwischen der Forderung nach möglichst großer Breite und Tiefe von Information und dem Anspruch auf Praktikabilität des Untersuchungsansatzes (vgl. auch BASTIAN & SCHREIBER 1999, S. 54).

Die Landschaftsökologie unterscheidet - gerade auch im Bereich der Bioindikation - verschiedene zum Teil hierarchisch aufeinander aufbauende Indikatoren wie

- spezifische - unspezifische Indikatoren;
- primäre, einfache - aggregierte Indikatoren;
- direkte - indirekte Indikatoren;
- sensitive - akkumulative Indikatoren (vgl. SCHUBERT 1991, S. 13 ff.; BASTIAN & SCHREIBER 1994, S. 53 ff.).

Bioindikatoren „sind Organismen, deren Lebensfunktionen sich mit bestimmten Umweltfaktoren so eng korrelieren lassen, daß sie als Zeiger dafür verwendet werden können“ (SCHUBERT 1991, S. 14).

Die oben genannten Indikatorarten werden im folgenden kurz allgemeingültig vorgestellt:

- Unspezifische Indikatoren reagieren auf verschiedene Faktoren gleichartig, spezifische Indikatoren hingegen können jeweils einem bestimmten Umweltfaktor zugeordnet werden.
- Bei primären Indikatoren sind einzelne Merkmale für Bewertungen direkt nutzbar, aggregierte Indikatoren verschiedener Hierarchiestufen sind notwendig, wenn ein Phänomen über zwei oder mehrere Einflußgrößen charakterisiert werden muß.
- Direkte Indikatoren reagieren unmittelbar auf Einfluß von außen, indirekte dagegen werden erst durch veränderte Zustände und Ausgangsgrößen evident und ansprechbar (s. Bsp. SCHUBERT 1991, S. 14).
- Sensitive Indikatoren reagieren auf Änderungen der Lebensumstände schnell mit signifikanten Normabweichungen bei Wuchsform, Lebensrhythmus, Besiedlungsdichte, Vitalität etc. und werden für „Frühindikationen“ eingesetzt. Akkumulationsindikatoren reichern demgegenüber Einflußgrößen, die über die Umgebung und Wechselbeziehungen aufgenommen werden, an, ohne kurzfristig erkennbare Schäden zu zeigen (vgl. SCHUBERT 1991, S. 13 ff.; BASTIAN & SCHREIBER 1994, S. 52 ff.).

Diese kurze Skizzierung des Verständnisses von Indikatoransätzen in der Landschaftsökologie ist notwendig, um die Gegenüberstellung mit dem Verständnis des Indikatoransatzes der Fernerkundung und die Ableitung des Begriffs des integrierenden/integralen Indikatoransatzes für diese Arbeit zu veranschaulichen.

Schon in Kapitel 1.3 ist ausgeführt worden, daß TROLL (1939) die Rolle der Vegetation als Indikator für die Luftbildforschung hoch geschätzt hat. Dieser frühe Ansatz ist von DODT (1974) anwendungsorientiert für Fragen der Raumplanung weiterentwickelt worden. Die Grundidee nach DODT ist, daß luftbildsichtbare Objekte Indikatorfunktionen für nicht im Luftbild sichtbare Objekte, Beziehungsgeflechte oder Wirkungszusammenhänge übernehmen können: „Denn diese sichtbaren Gegenstände und Strukturen (im Luftbild; Anm. d. Aut.) sind zum Teil ... Bestimmungsfaktor oder Ergebnis von Objekten und Strukturen ..., die sich im Luftbild ... einer direkten Beobachtung entziehen. Letzteres ... bedeutet, daß ... bestimmte

sichtbare Bildelemente als Indikatoren für die Erfassung nichtsichtbarer Bild- und Raumkategorien fungieren können. Damit erweist sich das Luftbild als ´doppelschichtiger Informationsträger´ (DODT 1974, S. 434). Nach DODT ist die enge Korrelation zwischen dem sichtbaren Bildelement und den abgeleiteten Objekten oder Strukturen die entscheidende Voraussetzung für die Aussagekraft und Qualität der abgeleiteten Aussagen. Unverzichtbar hierfür ist, daß der Indikator im Bild fehlerfrei identifiziert werden kann (DODT 1974, S. 435; vgl. auch SCHNEIDER 1984, S. 44 ff.). Darüber hinaus differenziert er Indikatoren nicht nur nach ihrem Auftreten/Vorhandensein bzw. ihrem Fehlen, sondern auch nach ihrer Ausprägung und nach Kombinationen von Indikatoren (DODT 1974, S. 437).

Der Indikatoransatz nach DODT ist in der Fernerkundung nicht wesentlich weiterentwickelt worden (vgl. z.B. COLWELL 1983, S. 1623 ff. oder die frühere Arbeit von COLLINS & EL BEIK 1971, S. 16 ff.). Stattdessen sind für die verschiedensten fernerkundlichen Analysen in Pedologie, Mineralogie, Geologie oder Geographie verschiedene Indizes entwickelt und verfeinert worden, die Indikatorfunktionen übernehmen und weite Verbreitung gefunden haben (vgl. auch LYON et al. 1998, S. 143 ff.). Diese Indizes fungieren z.B. auch im Rahmen von Biomassenuntersuchungen aus NOAA AVHRR-Daten als Indikatoren für phänologische Phasen. Dazu sind für diverse Pflanzenarten Indexformeln auf Basis des „Normalized Difference Vegetation Index“ (NDVI) entwickelt worden, aus denen der „Leaf Area Index“ (LAI) als abgeleitete Größe Indikatorfunktion für Biomassenproduktionen ausgewählter Pflanzenarten übernimmt (siehe z.B. BADHWAR et al. 1986, S. 265 ff.; CURRAN & WILLIAMSON 1988, S. 1243 ff.; DEMIRCAN 1995, S. 37 ff.; SU 1996, S. 100 ff.). Die Pflanzenvitalität bzw. die Biomassenproduktion wird hierbei vornehmlich aus der Reflexion im NIR abgeleitet. Sobald z.B. Bäume in Wintermonaten entlaubt sind, werden sie - diesem Fachjargon folgend - nicht mehr als vital angesprochen, obwohl sie es weiterhin sind.

Für die Indizes werden - im Unterschied zum DODTschen Ansatz - Informationen bzw. Datensätze aus vorhandenen digitalen Fernerkundungsdatensätzen neu generiert. Wichtig ist dabei das Reflexionsverhalten der Vegetation in den Spektralbereichen Rot und den nichtsichtbaren Bereichen Nahes Infrarot und Mittleres Infrarot, so daß diese Kanäle für die Generierung der neuen Datensätze vorzugsweise genutzt werden (s.u.).

Informationen aus diesen Spektralbereichen werden zwar für den Nutzer im Rahmen einer Analyse am PC-Monitor sichtbar und erfaßbar, sie liegen jedoch im nichtsichtbaren Spektrum (s. Ansatz nach DODT 1974). Hinzu kommt, daß sie zunächst nur der Herstellung von Indikatoren dienen; diese sind über die reine Visualisierung am Bildschirm zunächst nicht bildsichtbar/erfaßbar. Die neu generierten Informationen sind also zum überwiegenden Teil nicht nur aus nichtsichtbaren Bildinformationen abgeleitet (NIR-, MIR-Grauwerte), sondern sind erst nach den Rechenoperationen (i.a. Ratiobildung) erfaßbar und am Bildschirm visualisierbar, so daß hier in der Weiterentwicklung des DODTschen Ansatzes nicht mehr von bildsichtbaren Indikatoren gesprochen werden kann, sondern von künstlich generierten Indikatoren auf Basis des vegetationspezifischen Spektralverhaltens vor allem in nicht-sichtbaren Bereichen des elektromagnetischen Spektrums.

Dabei ist es - wie auch bei den Indikatoransätzen in der Landschaftsökologie - unerheblich, ob ein Indikator „Normalität“ bzw. „Natürlichkeit“ anzeigt oder auf, im allgemeinen anthropogen induzierte, Veränderungen aufmerksam macht. Allerdings ermöglichen die verschiedenen Indizes in ihrer Funktion als Indikatoren, daß die Ergebnisse objektiv nachvollziehbar sind. Analyse- und ergebnisbeeinflussende Subjektivität, wie sie z.B. im Rahmen konventioneller Luftbilddauswertung auftritt, wird durch diese Indikatoren eliminiert (Beispiel Waldschadenskartierung über verschiedene Variationen von Rottönen im CIR-Luftbild; vgl. HAYDN et al. 1985, S. 688).

Für die vorliegende Arbeit wird aus den Ansprüchen des SRU (1991), aus bewährten Unterscheidungskriterien für Indikatortypen in der Landschaftsökologie sowie aus dem Indikatorverständnis (nach DODT 1974 weiterentwickelt) ein neuer fernerkundlicher Indikatorbegriff abgeleitet und beschrieben: das Spektralverhalten der Vegetation als künstlich generierter, „integrierender bzw. integraler Indikator“ in der Fernerkundung.

Über das

- Vorhandensein oder Fehlen oder Verbreitungsmuster von Vegetation,
- ihre Ausprägungen, also ihre Reflexionseigenschaften v.a. im Nahen und Mittleren Infrarot sowie
- ihre Artenzusammensetzung
- werden Phänomene, die in den Faktoren Boden, Wasser etc. auftreten, ableitbar.

Diese zu untersuchenden Charakteristiken überschneiden sich zum Teil mit denen konventioneller Indikatoransätze; auf die spezifischen Eigenschaften und Vorteile der Nutzung von Fernerkundungsdaten ist - auch für diese Zusammenhänge zutreffend - bereits in Kapitel 1.3 hingewiesen worden.

Versucht man die Vegetation als integralen Indikator über Ansätze der Landschaftsökologie zu erfassen, so muß man diesem Verständnis folgend von einem unspezifischen, in der Regel akkumulativen Indikator sprechen. Denn z.B. trockene, wenig vitale Vegetation kann bedingt sein durch die jeweilige phänologische Phase wie Reife, durch Trockenstress aufgrund von fehlender Bewässerung oder andere Wirkungszusammenhänge. Die Beziehungsgeflechte und Wirkungszusammenhänge werden allein durch eine Analyse des fernerkundlichen integralen Indikators Vegetation zunächst nicht aufgedeckt.

Aus Sicht der Fernerkundung handelt es sich hierbei allerdings - vor allem bei Untersuchungen des Reflexionsverhaltens von Vegetation im Nahen und Mittleren Infrarot - um einen spezifischen Indikator, da Identifikationen und abgeleitete Interpretationen aus spezifischen Spektralsignaturen direkt möglich sind.

Dieser Indikator wird um so genauer und aussagekräftiger,

- je anwendungsorientierter bzw. „enger“ die Auswahl der Spektralkanäle erfolgt, um die Spektralsignatur von Objekten mit Indikatorfunktion bzw. Objekten, aus denen sich künstliche Indikatoren generieren lassen, isolieren zu können. Dies mündet häufig in der

Nutzung multispektraler und zunehmend auch hyperspektraler Fernerkundungsdatensätze;

- je besser die Qualität der begleitend auszuwertenden Kollateralquellen ist.

Ein Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist folglich, die Vegetation über die Analyse von Indizes als Indikator in ihren verschiedensten Verbreitungsmustern, Reflexionseigenschaften und demzufolge Artenzusammensetzungen und Zuständen zu untersuchen, sie über die Indexwerte zu kalibrieren und die Resultate für weiterführende Untersuchungen zu erarbeiten. Dies wird gleichermaßen für naturbelassene Standorte wie auch anthropogen überformte forst- und landwirtschaftliche Flächen durchgeführt.

Für die vorliegende Arbeit kommen verschiedene *Vegetationsindizes als Indikatoransätze* für die Abschätzung der Verbreitung und Vitalität von Vegetation zum Einsatz. Ihre Aussagekraft basiert auf dem sehr verschiedenartigen Spektralverhalten bzw. Reflexionsvermögen der Vegetation im Rot, im NIR sowie im MIR des elektromagnetischen Spektrums (vgl. Abb. 4.2).

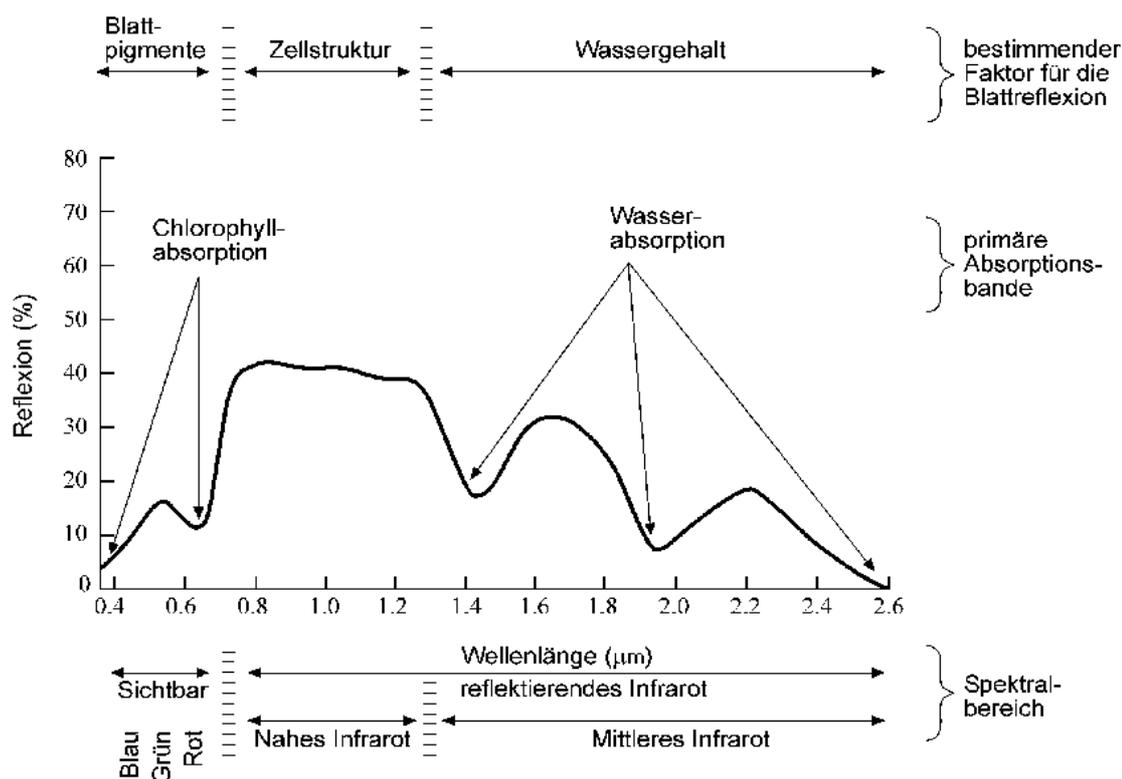


Abb. 4.2: Das typische Reflexionsspektrum von Vegetation. Quelle: SWAIN & DAVIS 1978, S. 232, verändert

Das Spektralverhalten wird dabei bestimmt durch die jeweilige Blattphysiognomie, die Zellstruktur und den Wassergehalt der Zelle (vgl. HILDEBRANDT 1996, S. 31 ff.). Dies kann für einige Pflanzenarten aufgrund der Reflexionswerte im Rot, NIR oder auch MIR sehr gut unterschieden werden, so daß die Pflanzen darüber identifiziert werden können. Hinzu

kommt, daß man für einige Pflanzenarten zusätzlich Vitalitätsgrade aus dem Reflexionsverhalten in den genannten Spektralbereichen ableiten kann (vgl. auch GUERRA et al. 1998, S. 2066 ff.).

Ziel der vorliegenden Arbeit ist allerdings nicht eine einzelobjektorientierte Analyse von Pflanzenarten und Vitalitätsstufen. Vielmehr sollen im Rahmen des fernerkundlich gestützten Umweltmonitorings Informationen über die Verbreitung von Vegetation sowie verschiedene Vitalitätsgrade von Vegetationsarealen zur Verfügung gestellt werden. Aufgrund der vorherrschenden Vegetationstypen und deren phänologischen Phasen wird es nicht immer möglich sein, verschiedene Pflanzenarten zusätzlich spektral voneinander zu trennen. Dies kann z.B. für Laub- und Nadelwaldflächen je nach Vitalitätsgrad oder für Grünland- und Ackerflächen je nach Anbauprodukt und phänologischer Phase sehr schwierig werden; Kollateraldaten zu diesem Themenkomplex stehen nicht zur Verfügung.

Hierzu werden aus der Vielzahl der Vegetationsindizes fünf ausgewählt und auf ihre Eignung und Aussagekraft für den Untersuchungsraum geprüft. Drei dieser Indizes finden laut Fachliteratur sehr weitverbreitete Anwendung für vegetationspezifische Fragestellungen; dazu gehören der NDVI, der SAVI (Soil Adjusted Vegetation Index) und der TSAVI (Transformed Soil Adjusted Vegetation Index). Der MNDVI (modified NDVI) wird für Analysen der Vitalität und der Feuchte der Pflanzen eingesetzt; er wird recht selten im Zuge spezieller Anwendungen genutzt, die jedoch dann über die üblichen Untersuchungen zu Vitalitätsgraden hinausgehen. Der RG-Index (Rot-Grün-Index) ist kaum verbreitet. Da er aber die einzige Möglichkeit eröffnet, in dem Color-Luftbildmosaik von 1990 Pflanzenvitalität über „Grünheitsgrade“ abzuschätzen, wird er ebenfalls geprüft.

Die Formeln lauten in Anlehnung an das spektrale Auflösungsvermögen der Landsat TM-Kanäle 3, 4 und 5 und des Colorluftbildmosaiks wie folgt (vgl. Tab. A.1, Anhang A):

$$a) : NDVI : \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

$$b) : MNDVI : \frac{MIR - NIR}{MIR + NIR}$$

$$c) : SAVI : \frac{(1+0.5)(NIR - GREEN)}{NIR + GREEN + 0.5}$$

$$d) : TSAVI : \frac{0.96916(NIR - 0.96916 * GREEN - 0.084726)}{GREEN + 0.96916 * NIR - 0.96916 * 0.084726}$$

$$e) : RG - Index = \frac{R - G}{R + G}$$

(weiterführend hierzu: LYON et al. 1998, S. 144; RICHARDSON & EVERITT 1992, S. 64; BARET et al. 1989, S. 1355 ff.; HOLOPAINEN & WANG 1998, S. 684).

Über die unterschiedlich hohen DN's vitaler Vegetation im NIR und Rot zeigt der Ratiowert der jeweiligen Pixel akzentuiert den Vitalitätsgrad der abgebildeten Vegetation auf. Ähnlich

verhält es sich für die DN<sub>s</sub> im MIR und NIR für die Berechnung des MNDVI. Auch der RG-Index folgt diesem Schema (vgl. Abb. 4.2). Durch Geländearbeiten, die zeitgleich zu den Aufnahmen durchgeführt werden, könnten die ermittelten Werte kalibriert werden; Umweltmonitoringverfahren sind allerdings in der Regel retrospektiv angelegt, so daß zeitgleiche Geländeuntersuchungen nicht möglich sind.

#### Zu a) NDVI

Seit Ende der 60er Jahre bis Mitte der 70er Jahre ist hierzu eine große Anzahl an Publikationen zu registrieren. Grundlegende und vergleichende Analysen zu Anwendungsbereichen und Aussagekraft verschiedener Indizes und abgeleiteter Kenngrößen wie z.B. dem LAI sind bei KAUTH & THOMAS 1976, S. 41 ff., TUCKER 1979, S. 127 ff., WIEGAND et al. 1979, S. 336 ff., POLLOCK & KANEMASU 1979, S. 307 ff. sowie PERRY & LAUTENSCHLAGER 1984, S. 169 ff. zu finden. Außerdem beschäftigt sich CRACKNELL (1997) in seinem Buch „The Advanced Very High Resolution Radiometer“ ausführlich mit der Geschichte der Ableitung verschiedener Vegetationsindizes, wobei Landsat MSS-Daten als Grundlage dienen.

Als mögliche ergebnisbeeinflussende Fehlerquellen der Ratiobildungen gelten Einflüsse wie Topographie, Sonneneinstrahlung und Atmosphärenbedingungen zum Aufnahmezeitpunkt, die Mischreflexion von durchscheinendem Boden und Vegetation in Mischpixeln sowie Alter, Dichte und Zusammensetzung von Vegetation. Um diese Einflüsse zu eliminieren oder zumindest zu minimieren, wurden sukzessive die ursprünglichen Ratioansätze (einfacher Ratioansatz über die Division von NIR und Rot, Multiratioansatz: NDVI) je nach Fragestellung und Gegebenheiten modifiziert und spezifiziert, so daß mittlerweile eine große Fülle von Vegetationsindizes vorliegt (vgl. PERRY & LAUTENSCHLAGER 1984, S. 169 ff.; BANNINGER 1986, S. 371 ff.; PUREVDORJ et al. 1998, S. 3519 ff.; GUERRA et al. 1998, S. 2066 ff.; TODD et al. 1998, S. 427 ff.; LYON et al. 1998, S. 143 ff.; PINDER III. & MCLEOD 1999, S. 495 ff.; HARDY & BURGAN 1999, S. 603 ff.).

Im Mittelpunkt dieser Untersuchungen und Modifikationen stehen immer wieder vergleichende Analysen des NDVI mit anderen Indizes. Verschiedene Untersuchungen dokumentieren zwar die Empfindlichkeit des NDVI gegenüber der Topographie (vgl. RICHARDSON & EVERITT 1992, S. 64 ff.; LYON et al. 1998, S. 149), dem Einfluß der Atmosphärenbedingungen (vgl. WASHINGTON-ALLEN et al. 1998, S. 1325), dem Einfluß von Bodenreflexion auf die Vegetationsreflexion in Mischpixeln sowie die Empfindlichkeit gegenüber verändertem Reflexionsverhalten in Abhängigkeit von der Zusammensetzung und der Physiognomie der Vegetation, ihrem Alter und ihrer jeweiligen phänologischen Stadien (weiterführend hierzu: TODD & HOFFER 1998, S. 915 ff.; PUREVDORJ et al. 1998, S. 3520 ff.; RICHARDSON & EVERITT 1992, S. 64 ff.; PINDER III. & MCLEOD 1999, S. 495 ff.; TODD et al. 1998, S. 429 ff.).

Der Einfluß der genannten Parameter auf die Ergebnisse der NDVI-Berechnungen ist jedoch in der Mehrzahl der Fälle geringer als bei anderen Vegetationsindizes, die aufgrund ihrer Spezifikationen nicht mehr universell einsetzbar sind. Außerdem reagieren diese Indizes

häufig auf bestimmte Einflußgrößen, wie z.B. Topographie, überproportional empfindlich. Folglich liefert der NDVI meist die Resultate mit der größten Aussagekraft über die Vitalitätsgrade von Vegetation und ihrer räumlichen Verteilung (vgl. CRACKNELL 1997, S. 233 ff.; SCHWARZKOPF et al. 1992, S. 19 ff.; LYON et al. 1998, S. 143 ff.).

#### Zu b) MNDVI

Der modifizierte NDVI verwendet die TM-Kanäle 4 und 5 (NIR und MIR) und liefert einerseits nach HOWARD (1991) Informationen über den Vitalitätsgrad von Vegetation (vgl. auch STIBIG & BALTAJE 1991, S. 258 ff.; HILDEBRANDT 1996, S. 54 ff.; JÜRGENS 1997, S. 3583 ff.). Andererseits können aus dem Index Aussagen über den jeweiligen Feuchtigkeitsgehalt von Vegetation abgeleitet werden. Mögliche Anwendungsbereiche hierzu sind

- die Überwachung von Bewässerungsrhythmen in der Landwirtschaft,
- Feststellung von Reifezuständen von Getreide oder
- die Überprüfung von Trockenstress bei Wäldern in exponierten Lagen.

Je höher der Feuchtigkeitsgehalt einer Pflanze ist, desto geringer ist ihre Reflexion im MIR. Dadurch sind die Ratiowerte feuchter Vegetation auf einer Skala von -1 bis +1 kleiner als die Werte von weniger feuchter bzw. dann trockenerer Vegetation (vgl. Abb. 4.3, MNDVI-Formel, Tab. A.1, Anhang A gibt Auskunft über die Spektralkanäle).

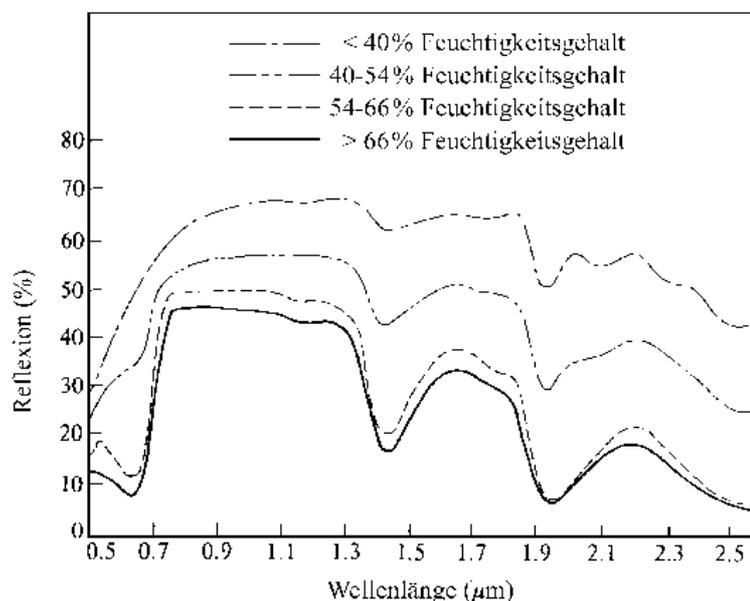


Abb. 4.3: Das Reflexionsverhalten eines Blattes in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt. Quelle: SWAIN & DAVIS 1978, S. 239 (verändert nach HOFFER & JOHANNSEN 1969), verändert

#### Zu c) und d) SAVI und TSAVI

TSAVI und SAVI kompensieren bzw. minimieren den Einfluß durchscheinender Bodenreflexion in vegetationsbestandenen Flächen durch die Korrekturfaktoren in den oben

genannten Formeln (vgl. LYON et al. 1998, S. 144; RICHARDSON & EVERITT 1992, S. 64; BARET et al. 1989, S. 1355 ff.). Die Bodenreflexion wird dabei einerseits durch die Vegetationsdichte bestimmt; andererseits wird sie auch festgelegt durch die jeweiligen Reflexionseigenschaften eines Bodens, die je nach Gehalt an organischen Bestandteilen, Eisenoxiden, Feuchtigkeit sowie Farbe, Textur und Bodenart schwanken.

Abbildung 4.4 zeigt vereinfacht das Reflexionsverhalten von „hellen“ bzw. stark reflektierenden und „dunklen“, also schwach reflektierenden Böden im Vergleich zu der typischen Spektralsignatur von Vegetation. Dabei wird deutlich, daß „helle“ Böden im NIR ein recht ähnliches Reflexionsverhalten wie Vegetation aufweisen. Da sie allerdings auch im Rot recht hohe Reflexionswerte haben, führt dies bei der Berechnung des NDVI zu relativ kleinen Ratiowerten; für diese Untersuchungseinheit wird der abgeleitete Vitalitätsgrad verfälscht, da er reduziert wird. Die Vegetation allein kann dabei sehr vital sein; die Bodenreflexion beeinflusst die Mischreflexion hier sehr negativ.

Demgegenüber zeigen „dunkle“ Böden einen tendenziell gegenteiligen Einfluß auf die Berechnung des NDVI, da sie im Rot ähnlich wenig wie die Vegetation reflektieren. Allerdings liegen die Werte auch im NIR recht niedrig, so daß hier die Ratiowerte - wenn auch nicht so stark wie bei dem Einfluß durch „helle“ Böden - reduziert werden (TODD et al. 1998, S. 428 ff.).

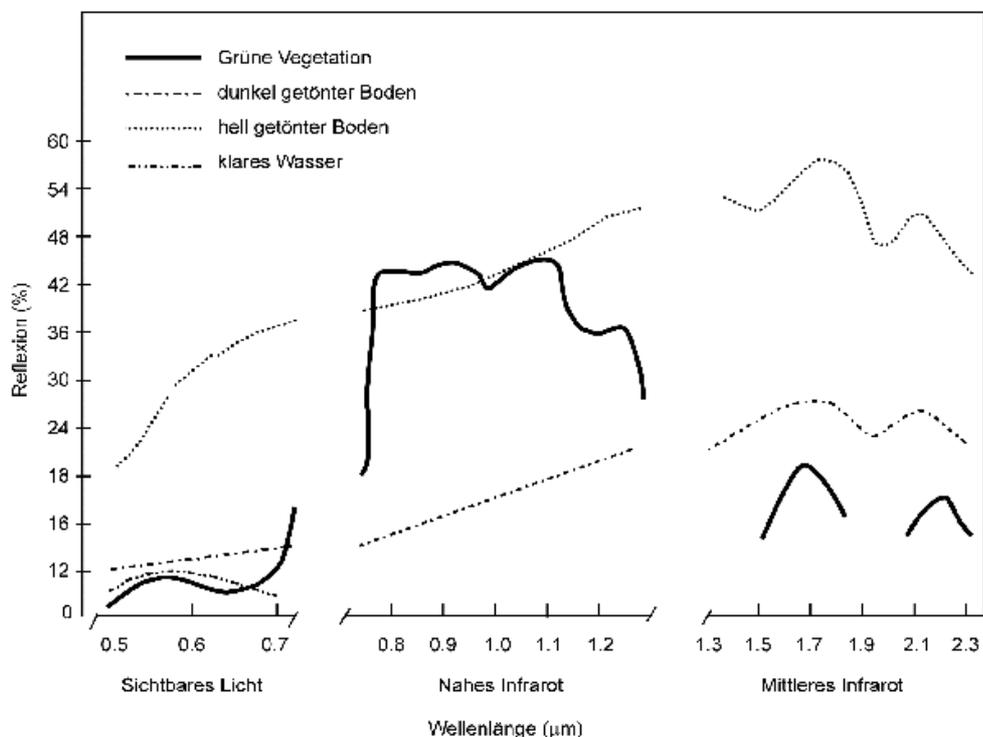


Abb. 4.4: Typische Reflexionskurven von stark und schwach reflektierenden Bodenoberflächen im Vergleich zur typischen Reflexion von Vegetations- und Wasserflächen. Quelle: TODD et al. 1998, S. 428, verändert

Ähnlich dem hier aufgezeigten Beispiel „Boden“ wirken bereits zuvor genannte Einflußgrößen wie das Alter bzw. der Holzanteil an der Vegetation, die Phänologie etc. auf das Ergebnis ein.

Durch stichprobenartige vergleichende Analysen von SAVI und TSAVI wird ersichtlich, daß der SAVI für einzelne Standorte sehr viel differenziertere Aussagen über Vitalitätsgrade zuläßt als der TSAVI, obwohl beide Indizes sehr stark miteinander korrelieren. Allerdings sind sie für Flächen mit geringen Vitalitätsgraden der Vegetation weniger sensibel als der NDVI. Sie zeigen die räumliche Verteilung gering vitaler Flächen nicht so differenziert auf wie der NDVI (vgl. LYON et al. 1998, S. 144; RICHARDSON & EVERITT 1992, S. 64).

Darüber hinaus werden Korrelationsanalysen zu der möglichen redundanten/ähnlichen bzw. vergleichbaren Information, die eventuell der TSAVI und SAVI im Vergleich zum NDVI bieten, durchgeführt (Pearsonscher Korrelationskoeffizient  $r$ ; vgl. BENNINGHAUS 1982, S. 189 ff.). Damit soll geprüft werden, inwieweit die drei Indizes redundante Informationen liefern, so daß gegebenenfalls auf einen oder zwei der Indizes im weiteren Verlauf der Arbeiten verzichtet werden kann. Dieses gängige Vergleichsverfahren wird häufig benutzt, um Parallelen in den Ratiowerten z.B. vom NDVI mit dem GVI (Green Vegetation Index), dem BI (Brightness Index), dem WI (Wetness Index) oder dem LAI als abgeleitete Größe sowie deren Aussagekraft zu untersuchen (weiterführend hierzu: WIEGAND et al. 1979, S. 336 f.; TODD et al. 1998, S. 428 ff.; HURCOM & HARRISON 1998, S. 3113 ff.; VERNA et al. 1998, S. 2469 ff.). Die Analysen zum Informationsgehalt von TSAVI und SAVI werden exemplarisch an dem Luftbildmosaik von 1985 und dem Landsat TM-Datensatz von 1991 durchgeführt. Die Berechnungen dazu werden mit dem Tabellenkalkulationsprogramm EXCEL durchgeführt. Dafür werden die Daten aus ERDAS Imagine ex- bzw. importiert. Für die Berechnungen des Datensatzes von 1991 können alle Pixeldaten benutzt werden. Dies gestaltet sich für die Analysen des Luftbilddatensatzes schwieriger, da ein Pixelumfang von 40.738.062 für eine Übersichtsanalyse in EXCEL zu groß ist. Aus diesem Grund werden hier 30 Stichproben, die 5,8 % (2.372.400 Pixel) des gesamten Datensatzes umfassen, untersucht. Die Ergebnisse sind in den Tabellen 4.1 und 4.2 aufgeführt.

Tab. 4.1: Der Pearsonsche Korrelationskoeffizient für die Ratios sowie die Kanäle Grün und Rot des Landsat TM-Bild-Ausschnitts vom 02.07.1991

Korrelation von NDVI und MNDVI	$r = -0,83946211$
Korrelation von NDVI und SAVI	$r = 0,97759645$
Korrelation von NDVI und TSAVI	$r = 0,97768263$
Korrelation von Grün zu Rot	$r = 0,91072184$
$r =$ Pearsonscher Korrelationskoeffizient	

Tab. 4.2: Der Pearsonsche Korrelationskoeffizient für die Ratios sowie die Kanäle Grün und Rot des CIR-Luftbildes vom 24.07.1985: empirisch ausgewählte Stichproben

	<b>NDVI zu SAVI CIR-Luftbild</b>	<b>NDVI zu TSAVI CIR-Luftbild</b>	<b>Grün zu Rot CIR-Luftbild</b>
1 r	0,95371943	0,95383908	0,97656407
2 r	0,95770151	0,95783586	0,98592377
3 r	0,95359231	0,95363472	0,96783161
4 r	0,94706660	0,94745147	0,95641510
5 r	0,92976780	0,93027048	0,93465061
6 r	0,89952752	0,89982229	0,88174096
7 r	0,93310833	0,93309370	0,94126198
8 r	0,91271925	0,91273083	0,97636671
9 r	0,91058494	0,91068042	0,98086667
10 r	0,91691044	0,91695026	0,98589446
11 r	0,90177373	0,90175420	0,96307254
12 r	0,90771259	0,90757366	0,97441550
13 r	0,91583259	0,91546264	0,96602904
14 r	0,92422630	0,92401082	0,96804235
15 r	0,85041134	0,85011873	0,94984614
16 r	0,85792985	0,85775814	0,94289749
17 r	0,86901426	0,86887099	0,94054760
18 r	0,92054670	0,92057168	0,95555201
19 r	0,81188565	0,81167621	0,97510627
20 r	0,80720498	0,80688757	0,95126536
21 r	0,71111974	0,71058452	0,95399464
22 r	0,80288055	0,80267105	0,96408791
23 r	0,84978752	0,84927991	0,95494076
24 r	0,84879036	0,84854143	0,95616123
25 r	0,92683259	0,92700332	0,98283141
26 r	0,92570508	0,92584954	0,98157860
27 r	0,92625192	0,92653722	0,94740219
28 r	0,94941060	0,94959957	0,97139057
29 r	0,91809795	0,91845758	0,97302497
30 r	0,89650089	0,89696686	0,91431486
<b>arithm. Mittel:</b>	<b>0,894554</b>	<b>0,894549</b>	<b>0,959134</b>
r = Pearsonscher Korrelationskoeffizient			

Wie allein schon der Formelaufbau von SAVI und TSAVI dokumentiert, differieren die beiden Formeln nur durch den Einsatz von Konstanten leicht; in beiden Fällen werden dieselben Kanäle benutzt. Dies wird durch das sehr ähnliche Korrelationsverhalten der beiden Indizes jeweils mit dem NDVI bestätigt (vgl. Tab. 4.1, 4.2). Zusätzlich wird die Korrelation der Kanäle Rot und Grün analysiert, um zu prüfen, inwieweit hierdurch eine Korrelation von NDVI und SAVI bzw. TSAVI trotz der Nutzung unterschiedlicher Spektralkanäle gegeben ist. In beiden Datensätzen liegt dieser Wert jeweils deutlich über 0,9 (TM-Szene: 0,91; CIR-Luftbildszene: 0,96).

#### Zu e) RG-Index

Das Luftbildmosaik von 1990 stellt in diesem Zusammenhang einen Sonderfall dar, da die Spektralkanäle nur in den Bereichen Blau, Grün und Rot, nicht aber im NIR liegen. Um trotzdem Zusatzdaten in Form eines Ratiobildes für die wissenschaftliche Klassifizierung nutzen zu können, wird ein modifizierter Ansatz des NDVI verwendet.

Aufgrund der hohen Absorption von Strahlung durch grüne, vitale Vegetation im Rot und zugleich einer im Vergleich dazu höheren Reflexion der Vegetation im Grün (vgl. Abb. 4.2: erster „Vitalitätsgipfel“) können auch hier abgeleitete Informationen über die Vitalitätsgrade von Vegetation erwartet werden - auch wenn sie mit denen der anderen Ratiodatensätze aufgrund der Eigenschaften der Spektralkanäle sowie der Kanalkombinationen der Formeln nicht vergleichbar sind.

Dieser Ratioansatz scheint in der Fachwelt wenig verbreitet zu sein (HOLOPAINEN & WANG 1998, S. 684). Aus diesem Grund wird der Ansatz in der vorliegenden Arbeit vorbehaltlich seiner Eignung und Aussagekraft bezüglich der Vitalitätsgrade genutzt, denn weitreichende Erfahrungen wie z.B. mit der Nutzung des NDVI sind in der Fachliteratur nicht dokumentiert (HOLOPAINEN & WANG 1998, S. 684).

#### Bewertung der untersuchten Indizes

Aufgrund der Erfahrungswerte und der Empfehlungen in der Fachliteratur (vgl. o.) wird der NDVI für die vorliegende Studie als Indikator für die Vegetation in ihrer Ausprägung und Verteilung eingesetzt. Dies wird unterstützt durch die hohen Korrelationen, die für SAVI und TSAVI mit dem NDVI berechnet wurden (s.o.). Hinzu kommen weitreichende Erfahrungen mit Korrelationsanalysen dieser drei Ratios, die in der Fachliteratur dokumentiert sind. Aus Gründen der Effizienz und der Ökonomie wird folglich auf SAVI und TSAVI im weiteren Verlauf der Arbeiten verzichtet.

Da der MNDVI spezifische Zusatzinformationen zur Vegetation liefert, wird er begleitend zum NDVI für die Untersuchungen der Datensätze genutzt. Erste Tests mit dem RG-Index für das Color-Luftbildmosaik von 1990 haben zudem gezeigt, daß der RG-Index sehr gut zur Abschätzung von „Grünheitsgraden“ genutzt werden kann und relevante Informationen

auch für die wissensbasierte Klassifikation liefert; er wird daher eingesetzt. Er wird darüber hinaus für weitere Anwendungen dieser Art empfohlen.

### Methodik

Für die Berechnung der NDVIs für die Untersuchungsgebiete in den verschiedenen Fernerkundungsszenen wird die in ERDAS 8.4 implementierte Routine benutzt. Diese Routine wird für die Berechnungen des MNDVI, des SAVI, des TSAVI und des RG-Index sowie die NDVI-Berechnungen der Luftbildmosaike modifiziert, um die Ergebnisdaten einheitlich auf das Intervall -1 bis +1 zu kalibrieren. Aufgrund der Berechnung des SAVI und des RG-Index kommt es dabei zu leicht abweichenden Intervallen (je nach Datensatz zumeist größer als -1 bis +1).

Danach werden die NDVI-, SAVI-, TSAVI-, MNDVI-Bilder und das RG-Indexbild mit einer Intervallgröße von 0,05 klassifiziert (Verfahren der Äquidensitenbildung bzw. „density slicing“: vgl. auch MATHER 1999, S. 109 ff.; LILLESAND & KIEFER 1999, S. 489 f.), wobei Bereiche des Gesamtintervalls, die keine Angaben zu Vitalität bzw. Vitalität und Feuchtigkeit ermöglichen, bei der Klassifizierung nicht berücksichtigt werden (für NDVI:  $\leq 0$ , für den MNDVI:  $\geq 0$ , für den RG-Index:  $\geq 0$ ). Hierbei werden für die Satellitenbilddatensätze je einmal die auf DN-Werte atmosphärenkorrigierten Datensätze und die auf Reflexionswerte korrigierten Datensätze verwendet, um auch saisonale phänologische Schwankungen untersuchen zu können. Dieser Schritt ist notwendig, um vergleichbare Informationen zu erhalten. Da die auf Reflexionswerte atmosphärenkorrigierten Datensätze die reale Verteilung und Häufigkeiten dieser Verteilungen von Reflexionen aufzeigen, ermöglichen sie einen Vergleich. Im Gegensatz dazu sind die auf DN-Werte korrigierten Datensätze unterschiedslos auf den verfügbaren Grauwertbereich von 0-255 gestreckt, so daß selbst Datensätze, die frühe phänologische Phasen abbilden, hohe Reflexionswerte durch die Spreizung aufweisen. Das führt häufig zu Fehlinterpretationen. Durch die kombinierte Vorgehensweise werden die Ratiobilder sowohl bezogen auf einen Aufnahmezeitpunkt (NDVI, MNDVI z.B. für den 02.07.1991) als auch im Rahmen der gesamten Zeitreihenanalyse vergleichbar.

Stichprobenartige vergleichende Untersuchungen der Klassifizierung der Bilder durch Intervallbildung und der Klassifizierung durch eine Histogrammanalyse der Ratiobilder haben zudem ergeben, daß eine Intervall-Klassifizierung sehr viel detailliertere Aussagen über die Vitalität von Flächen zuläßt. Hinzu kommt, daß für diese Methodik nur eingeschränkt Vorkenntnisse und Erfahrungen in der Analyse von Fernerkundungsdaten benötigt werden und die Handhabung dadurch auch für fachfremde Nutzer wesentlich erleichtert wird.

Die Ergebnisse der farbkodierten Klassifizierungen sind in Kapitel 5.1 aufgeführt. Weiterführende Analysen der Index-Bilder wie auch der Ratiowerte werden im Rahmen der wissensbasierten Klassifizierungen (vgl. unten) vorgenommen.

## 4.2.2 Eingangsdaten für die wissensbasierten Klassifikationen: Generierung und Vorbereitung

Als Eingangsdaten/Variablen für die wissensbasierte Klassifizierung dienen:

- Die von der Autorin digitalisierten Landnutzungskartierungen aus DGK-5-Blättern für die Klassifizierung der Luftbilddatensätze (GK-Koordinaten: RW: <sup>25</sup>80-<sup>25</sup>84, HW: <sup>57</sup>30-<sup>57</sup>34, aus den Jahren 1987-1997) werden in ArcView erstellt. Diese Datensätze werden in ERDAS Imagine geladen und in Rasterdatensätze konvertiert. Dieser Schritt ist notwendig, da die ArcView-Datentypen (ArcInfoCoverage bzw. shapedateien) - trotz der ausgewiesenen Möglichkeit, Vektordatensätze in den Klassifikator zu integrieren - nicht einsetzbar sind. Damit liegen die Landnutzungskartierungen als Rasterdaten- und nicht als Vektordatenmasken vor und dienen im Rahmen der wissensbasierten Klassifikation der Segmentation der Luftbilddatensätze. Kartiert werden folgende Landnutzungstypen:
  - Wasserflächen,
  - Ackerflächen,
  - Grünlandflächen,
  - Straßenflächen (lt. DGK5: befestigte Straßen),
  - Waldflächen getrennt nach laub- und nadelwalddominierten Waldflächen,
  - Mischnutzung (Grundstücke mit Bebauung, i.d.R. Wohnbebauung, vorzugsweise in parzellenscharfer Abgrenzung digitalisiert, alternativ aufgrund von Nutzungsgrenzen wie z.B. Grünland).
- Die ATKIS- DLM-25-Daten (1999, GK-Koordinaten: RW: <sup>25</sup>80-<sup>25</sup>89, HW: <sup>57</sup>27-<sup>57</sup>35) werden zunächst mit der EDBSARC-Schnittstelle, Umsetzer EDBSARC 5.0 der Firma ESRI konvertiert (EDBS: einheitliche Datenbankschnittstelle, ein Datenformat, das in ein ArcInfo-Datenformat umgewandelt wird). Nach interner Trennung der Datensätze unter ArcView in einzelne thematische Masken werden folgende Objektartengruppen zu Ausgabeklassen zusammengefaßt, wobei der Objektartenkatalog von ATKIS der Orientierung dient:
  - Absetzbecken (Objektartenschlüssel-Nr. 2314),
  - Ackerland (Nr. 4101),
  - Bahnanlagen, Unter- und Überführungen (Nrn. 3103, 3204, 3302, 3501, 3514),
  - Flächen für den Freizeitbedarf (Nrn. 2201, 2202, 2213, 2222, 2224, 2226, 2227, 2228),
  - Flächen mit besonderer funktionaler Bedeutung (Nr. 2114),
  - Gartenland und Sonderkulturen (Nrn. 4103, 4109),
  - Gehölz (Nr. 4108),
  - Gewässer (Nrn. 5101, 5102, 5112),
  - Grünland (Nr. 4102),
  - Heide, Moor, Moos (Nrn. 4104, 4105),
  - Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen (Nrn. 2112, 2113, 2114, 2121, 2122, 2127, 2129, 2132, 2134),
  - nasser Boden (Nr. 4111),
  - Schleusenbauwerke (Nrn. 5303, 5304),
  - Straßenflächen (Nrn. 3101, 3105, 3106),
  - Fläche: vegetationslos bzw. z.Zt. nicht bestimmbar (Nrn. 4120, 4199),
  - Wald, Forst (Nr. 4107),

- Wohnbaufläche (Nr. 2111) (Quelle: <http://a5.leipzig.ifag.de:8080/dstinfo>).

Die Objektgruppen „Gehölz“ und „nasser Boden“ sowie „Absetzbecken“ und „Industrie-, Gewerbe- und Sonderflächen“ werden für die wissensbasierten Klassifizierungen weiter zusammengefaßt zu „Gehölz und nasser Boden“ und „Industrie-, Gewerbe- und Sonderflächen“. Die Datensätze werden wie die oben genannten Datensätze in ERDAS Imagine geladen und weiter konvertiert. Sie liegen dann als Rasterdatenmasken vor und können zur Bildsegmentation der Satellitenbilddatensätze verwendet werden.

- Die Spektralkanäle der einzelnen Fernerkundungsdatsätze benötigen keine weiteren Vorverarbeitungen und werden im Rahmen der Klassifizierung direkt als Variablen genutzt (s.u.).
- Für die einzelnen Fernerkundungsdatsätze werden zudem die zuvor generierten NDVI-Bilder (MNDVI-Bilder) bzw. das RG-Indexbild als weitere Eingangsvariablen genutzt (s.o.).

### 4.2.3 Klassifikation der Fernerkundungsdaten - theoretischer Hintergrund

Im Rahmen der vorliegenden Studie werden die Fernerkundungsdaten mit Hilfe des wissensbasierten Klassifikators, der in ERDAS Imagine 8.4 implementiert ist, klassifiziert. Er ist eine Weiterentwicklung vielfältiger bestehender Ansätze zur Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit von Fernerkundungsdaten.

Spätestens seit Anfang der 70er Jahre werden Fernerkundungsdaten aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften klassifiziert. Da die Klassifikationsergebnisse oft nicht den Genauigkeitsansprüchen der Nutzer entsprachen, wurde immer wieder versucht, die Ergebnisse zu verbessern. Zunächst bot die Kombination von *unüberwachter* (z.B. ISODATA-Bündelung) und *überwachter Klassifikation* (z.B. Klassenzuweisung nach maximaler Mutmaßlichkeit, „Maximum-Likelihood“) Verbesserungen. Dieses Verfahren wird als Hybrid-Klassifikation bezeichnet; das gilt auch für die Kombination von parametrischen und nicht-parametrischen (also geometrischen) Klassifikationsansätzen im Rahmen einer überwachten Klassifizierung. Hierdurch werden die Resultate weiter optimiert (s. auch Bsp. bei: FLEMING 1975, S. 97 ff.; BEAUBIEN 1979, S. 1135 ff.; LA PERRIERE et al. 1980, S. 881 ff.; THOMPSON et al. 1980, S. 125 f.; WALSH 1980, S. 11 ff.; LILLESAND & KIEFER 1999, S. 544 f.).

Im nächsten Entwicklungsschritt der Verfeinerung von Spektralklassifizierungen wurden *zusätzliche räumliche Daten*, die anfänglich über Vektordigitalisierung erzeugt wurden, gerastert und als Informationsschicht den Spektralkanälen zugefügt. In den meisten Anwendungen waren dies DGMs, die Höhenangaben, Hangneigung oder Exposition enthalten (vgl. LILLESAND & KIEFER 1999, S. 584 f.). Später wurden diese Daten noch um Informationsschichten wie die HKTs, Temperatur- und Niederschlagsverteilung, Bodentypen, Art und Grad der Vegetationsbedeckung aus konventioneller Luftbildinterpretation oder Ratiobildern

erweitert (vgl. auch SKIDMORE 1989, S. 1450; JENSEN 1996, S. 244; MATHER 1999, S. 201; EINMNOH & SHRESTRA 2000, S. 299 f.).

Zusätzlich wurden im Rahmen dieses Forschungsstandes *vorklassifizierte Informationsschichten* wie z.B. rechnergestützt erzeugte Waldklassifizierungen aus Fernerkundungsdaten zusammen mit den anderen Daten für die Klassifikation benutzt. Dies wird vielfach „Multisource-Classification“, „Multiquellenklassifikation“, genannt. Hier finden vor allem *nicht-parametrische Klassifizierungsverfahren* Anwendung, da die Zusatzdaten häufig nicht normal verteilt sind und folglich die Voraussetzung für eine parametrische Klassifizierung nicht erfüllen (i.d.R. „Maximum-Likelihood“-Verfahren: siehe auch DUDA & HART 1973, S. 31 ff.; TOM & MILLER 1980, S. 1385 f.; SKIDMORE 1989, S. 1450 f.; KLOER 1994, S. 1 ff.). Zeitgleich konzentrierte sich eine kleinere Gruppe von Experten auf die *Integration von GIS-Daten in Spektralklassifizierungen*, die aufgrund der nicht immer verifizierbaren Genauigkeit und Richtigkeit dieser Eingangsdaten wiederholt in die Kritik geriet (vgl. COULTER et al. 1999, S. 1293 ff.; BAUMGARTNER et al. 1999, S. 777 ff.; GONG & LI 2000, S. 619 ff.).

Für den Einsatz ergänzender Informationen gibt es zwei Methoden:

1. sie können als a-priori-Information einfließen und folglich die Klassifikation vorbestimmen oder
2. sie werden im Laufe der Klassifikation sukzessive genutzt.

Zwei weitere sehr populäre Verfahren zur Optimierung der Klassifikationsgenauigkeit verdeutlichen die oben genannten Einsatzmöglichkeiten:

- a) die *Stratifizierung* bzw. Segmentation von Fernerkundungsdaten vor der Klassifizierung aufgrund von Zusatzinformationen (a priori),
- b) das sogenannte „*Post-Classification-Sorting*“, die Nachkorrektur einer überwachten Klassifizierung mit Hilfe von Zusatzdaten (vgl. SKIDMORE 1989, S. 1450; HARRIS & VENTURA 1995, S. 993 f.; JENSEN 1996, S. 244 f.; COULTER et al. 1999, S. 1298; MATHER 1999, S. 198).

#### Zu a) Stratifizierung bzw. Segmentation

Die Stratifizierung bzw. die Segmentation kann sich auf verschiedene Informationsebenen beziehen wie z.B.

- Landnutzungsklassen,
- Höhenstufen,
- Spektralverhalten,
- Mit- und Gegenlichtbereiche eines Luftbilddatensatzes (weiterführend hierzu: HUTCHINSON 1982, S. 123 ff.; TALBOT & MARKON 1986, S. 791 f.; SKIDMORE 1989, S. 1450; BAHR & VÖGTLE 1991, S. 170f.; HARRIS & VENTURA 1995, S. 993 f.).

Die genannten Themenfelder werden über die Stratifizierung bzw. die Segmentation von den anderen Bildinhalten isoliert, bevor sie bearbeitet und analysiert werden.

Zu b) „Post-Classification-Sorting“

Hier wird eine überwachte Klassifizierung, die zu konfusen Ergebnisklassen geführt hat (z.B. in bezug auf Industrie- und Gewerbeflächen), nachträglich mit Hilfe der Zusatzinformationen „entwirrt“. Das geschieht z.B. über die folgende Kondition:

- wenn die Gebietskategorie Industrie ist, die Spektralklassifizierung aber eine Zugehörigkeit zu Gewerbe diagnostiziert hat, dann wird das Pixel (trotzdem) der Kategorie Industrie zugewiesen (vgl. auch HARRIS & VENTURA 1995, S. 993; COULTER et al. 1999, S. 1298).

Diese Einsatzvarianten legen zugleich die Schwächen, die die Nutzung von ergänzenden Daten hat, offen. Dies sind zum einen die Zuverlässigkeit, Verifizierbarkeit und Aktualität der zusätzlichen Informationen wie DGM, Temperatur- und Niederschlagsverteilung etc. Zum Teil ist dies gekoppelt mit der Auflösung der Daten bzw. der Datenerhebungsdichte (z.B. DGM-Rasterweite).

Darüber hinaus treten Probleme durch vorklassifizierte Eingangsdaten auf, die mit Zuweisungswahrscheinlichkeiten (i.d.R. durch das Verfahren der höchsten Mutmaßlichkeit sowie das ISODATA-Verfahren) behaftet sind und zugleich die Zusatzinformation für eine weitere zumeist parametrische Klassifizierung liefern (ebenfalls mit „neuen“ Zuweisungswahrscheinlichkeiten). Dies erfordert sehr aufwendige Genauigkeitskontrollen der Klassifizierungen („accuracy assessment“). Die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der endgültigen Klassifizierungen hängen von der Qualität der Eingangsparameter entscheidend ab.

Um diesen Unwägbarkeiten zu begegnen, wurden zunehmend Algorithmen zur Berechnung von Zuordnungswahrscheinlichkeiten einzelner Informationsebenen benutzt. Häufig eingesetzt wurden und werden u.a.

- der Jeffries-Matusita-Abstand,
- die Bayessche Wahrscheinlichkeit,
- Evidenzen (weiterführend hierzu: SKIDMORE 1989, S. 1451 f.; NUTZ 1992, S. 150 f.; BURGER 1992, S. 123 f.; COULTER et al. 1999, S. 1298).

Mit Hilfe des **Jeffries-Matusita-Abstandes** können die Irrtumswahrscheinlichkeiten von spektralen Trennbarkeiten ausgewählter Klassen abgeleitet werden (je dichter die Verteilung einer Klasse im spektralen Merkmalsraum und je größer der Abstand zu anderen Klassen, desto geringer ist die Irrtumswahrscheinlichkeit der Klassenzuweisung), weil sich dieser Ansatz auf den Fernerkundungsdatensatz bezieht (Spektralsignaturen).

Dagegen arbeiten das **Bayessche Theorem** sowie der **evidenztheoretische Ansatz** mit der Abschätzung von Klassifikationsgenauigkeiten aus den Zusatzinformationen, die sich aufgrund des Eintretens bestimmter Umstände wie z.B. Landnutzungen im Zusammenhang mit anderen ortsgebundenen Eigenschaften ergeben (z.B. Hangneigung, Exposition). So werden z.B. über die Parameter Bodenart, Hangneigung, Exposition und Höhenlage Eintrittswahrscheinlichkeiten von Acker-, Grünland oder Weinbau berechnet und in Matrizen darstellbar. Je nach Parameterausprägung am gegebenen Ort kann die Wahrscheinlichkeit für z.B. Weinbau bei 60 %, für Ackerbau bei 10 % und für Grünland bei 30 % liegen.

Dem evidenztheoretischen Ansatz folgend besteht demnach ein begründeter Verdacht für den Tatbestand, daß Weinbau aufgrund der ortsbezogenen Parameterausprägungen tatsächlich in dem Areal auftritt. Dabei stützen sich die Wahrscheinlichkeiten und Evidenzen auf die Häufigkeit des (möglichen) Eintretens (evidenztheoretischer Ansatz nach DEMPSTER 1967, 1968, S. 205 ff.; SHAFER 1976, S. 7 ff.; BURGER 1992, S. 123 ff.).

Im Rahmen dieses Themenkomplexes soll die *Fuzzyklassifikation*, die oft auch als „Soft-Classifier“ bezeichnet wird, kurz erwähnt werden. Der Grundgedanke der Fuzzyklassifikation wird häufig mißverstanden, so daß die Fuzzyklassifikation fälschlicherweise in den Zusammenhang mit Verfahren zur Berechnung von Zuordnungswahrscheinlichkeiten gestellt wird.

Tatsächlich versucht der Fuzzyansatz jedoch, die Realität, die zumeist durch Heterogenität von Objektklassen, deren Verteilung und Abgrenzung geprägt ist, wirklichkeitsgetreu wiederzugeben. Dabei konzentriert sich das Verfahren auf die gemischte Spektralinformation in Mischpixeln. Je nach Untersuchungsmaßstab wirkt sich die Mischpixelproblematik unterschiedlich stark aus.

Davon ausgehend, daß vordefinierte Klasseneigenschaften immer mit Unschärfen behaftet sind, werden gestufte Ähnlichkeiten von Objektarten - ausgedrückt über die DN's von Mischpixeln - festgestellt. Der Grad (stark bis schwach) der Mitgliedschaft eines Pixels zu einer (unscharf) vordefinierten Klasse wird über die Ähnlichkeit der spektralen Eigenschaften des Pixels bestimmt (vgl. Abb. 4.5). Folglich werden Mitgliedschaften eines Pixels zu mehreren Klassen möglich; die Klassenanzahl wird vom Nutzer bestimmt (vgl. auch JENSEN 1996, S. 241; MATHER 1999, S. 189 f., 195). Das Verfahren kann über Gewichtung- und Normalisierungsfaktoren weiter verfeinert werden.

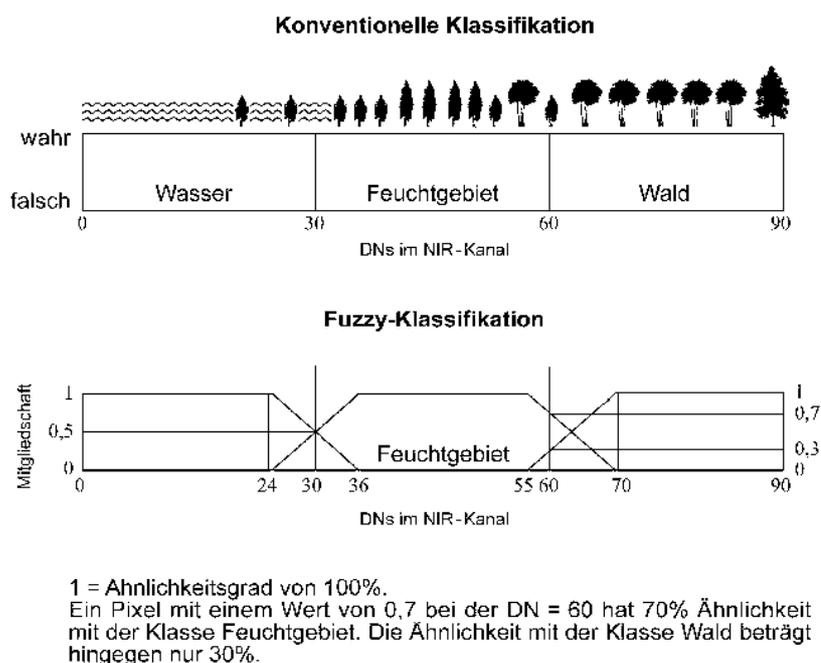


Abb. 4.5: Beispiel einer Fuzzyklassifikation. Quelle: JENSEN 1996, S. 240, verändert

Auch für den Fuzzyansatz gilt, daß Trainingsgebiete als Vorbereitung der überwachten Klassifikation ausgewählt werden müssen. Diese werden zu einem Großteil aber nicht mehr aufgrund ihrer spektralen Homogenität, sondern vielmehr aufgrund ihrer - realitätsnahen - spektralen Inhomogenität gewählt.

Dieser „Soft-Classifier“ bietet dem Nutzer folglich Entscheidungsmöglichkeiten in Form von verschiedenen Klassifikationsergebnissen und unterscheidet sich damit wesentlich von den sogenannten „harten“ Klassifikatoren (ein Ergebnis, eine Klasse pro Pixel). Der Fuzzyansatz kann vom Nutzer selbstverständlich jederzeit modifiziert werden, so daß mit ihm auch „harte“ Klassifizierungen möglich werden; diesen Vorgang nennt man dann Defuzzifikation (vgl. MATHER 1999, S. 195).

Weitere Möglichkeiten zur Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit sind die **Kontext-** bzw. **Nachbarschaftsanalysen** sowie die **Texturanalyse**. Beide Ansätze arbeiten nicht mehr pixel- und objektbezogen, sondern umgebungsbezogen.

Die **Kontextanalyse** wird häufig auch als **semantischer Ansatz** bezeichnet, da hier die Zusammenstellung „sinnvoller“ Nachbarschaftsbeziehungen im Vordergrund steht. Für die überwachte Klassifizierung werden häufig auftretende Nachbarschaften von Objekten und Objektarten eingespeist, die dann die Spektralklassifikation stützen. So liegen z.B. Nadelwaldflächen meist nicht in direkter Nachbarschaft zu Weinbergen, während Brücken im allgemeinen mit Straßen und Flüssen vergesellschaftet auftreten.

Die **Texturanalyse** arbeitet ähnlich, denn hier werden vorgegebene spektrale Variabilitäten in vordefinierten räumlichen Abstandsmaßen oder Fenstern (z.B. für Nadelwald) der klassischen Klassifizierung zugeführt. Manche Fachleute benutzen die Begriffe Texturanalyse und Mustererkennung sinnverwandt (weiterführend hierzu: SKIDMORE 1989, S. 1451 ff.; MOLLER-JENSEN 1990, S. 899 ff.; RIEKERT 1992, S. 19 f.; JENSEN 1996, S. 245; BAUMGARTNER et al. 1999, S. 780 f.; MATHER 1999, S. 198 ff.; TREITZ & HOWARTH 2000, S. 306 f.).

#### Bewertung der bisher vorgestellten Klassifikationsansätze

Eine hierarchische Strukturierung oder funktionale Zuordnung der bisher aufgeführten Klassifikationsverfahren und Ansätze zur Optimierung der Klassifizierungsgenauigkeit ist schwierig. Zu unterscheiden sind einmal Verfahren, die die spektralen Eigenschaften der Fernerkundungsdaten analysieren wie z.B. das Verfahren des Jeffries-Matusita-Abstandes, das der Texturanalyse oder das der Fuzzyklassifikation. Zum anderen stützen sich weitere Ansätze auf die Eigenschaften der Zusatzinformationen, die in eine überwachte Klassifizierung eingespeist werden. Hierzu zählen u.a. Kontextanalysen, evidenztheoretische Ansätze oder Wahrscheinlichkeitsberechnungen über das Bayessche Theorem. Allen Verfahren gemein ist jedoch, daß sie zumeist in Vorbereitung oder begleitend zu einer überwachten Klassifizierung zum Einsatz kommen; dabei werden sie durchaus miteinander kombiniert.

Zusammenfassend können hierbei folgende Schwächen der genannten Ansätze, trotz der Optimierung der Klassifikationsgenauigkeiten, herausgestellt werden:

- Die zusätzlichen Informationen verfügen nicht immer über die geforderte Zuverlässigkeit und Aktualität.
- Die räumliche Auflösung von Zusatzinformationen ist unzureichend (z.B. DGM-Rasterung).
- Die Festlegungen von Wahrscheinlichkeiten durch den Nutzer führen zu individuell unterschiedlichen Ergebnissen.
- Die Eingangsdaten, wie z.B. vorklassifizierte Datensätze, sind ebenfalls schon mit Wahrscheinlichkeiten behaftet.
- Aus diesem Grund sind immer sehr aufwendige Verfahren zur Überprüfung der Klassifikationsgenauigkeit erforderlich („accuracy assessment“).
- Die Vorbereitung der Eingangsdaten ist zumeist sehr arbeits- und zeitintensiv.

### Übergreifende Klassifikationsansätze

Diese Strukturen und Schwächen werden durch zwei weitere, in der Hierarchie über den genannten Verfahren stehende Klassifikationsansätze ausgeglichen:

- a) Klassifikation über **Neuronale Netzwerke**,
- b) Klassifikation über **Expertensysteme**.

#### Zu a) Klassifikation über **Neuronale Netzwerke**

Erste Entwicklungen von **Neuronalen Netzwerken** (NN) liegen weit zurück (1952: ROSENBLATT 1958, S. 386 ff.; ATKINSON & TATNALL 1997, S. 699). Danach stockte die Forschung auf diesem Sektor für Jahrzehnte, da die Kapazitäten von Hard- und Software unzureichend waren. Erst in den 80er Jahren erfuhr dieser Wissenschaftszweig neuen Aufschwung: mit dem MLP („Multi-Layer-Perception“, ungefähr zu übersetzen als Wahrnehmung und Verarbeitung vieler Informationsschichten) wurde ein noch heute sehr weit verbreitetes Modell der NN entwickelt.

Die Basisarchitektur gestaltet sich mit

- (1) „input layer“ (Schicht zur Aufnahme von Eingangsdaten),
- (2) „interne layer“ (Schichten, in denen die Daten verarbeitet werden) und
- (3) „output layer“ (Schicht zur Ausgabe der Ergebnisse)

einfach.

Die einzelnen Schichten sind untereinander in vielen Kombinationen miteinander verknüpft (vgl. Abb. 4.6). Die Verbindungen sind mit Gewichtungen belegt. Die Verknüpfungen folgen dem „feed-forward“-Prinzip (das „feed-back“-Konzept ist wenig verbreitet). Das heißt, daß die Informationen in den MLP-Algorithmus über den „input-layer“ gelangen und das Netzwerk über gewichtete Wege passieren. Dabei werden die passierenden Signale über die Gewichtungsfaktoren der Knoten modifiziert, bevor sie weitergegeben werden. Dadurch

werden die Wege vordeterminiert, so daß im folgenden die Auswahl der Netzwerkwege verringert bzw. stringenter wird („feed-forward“).

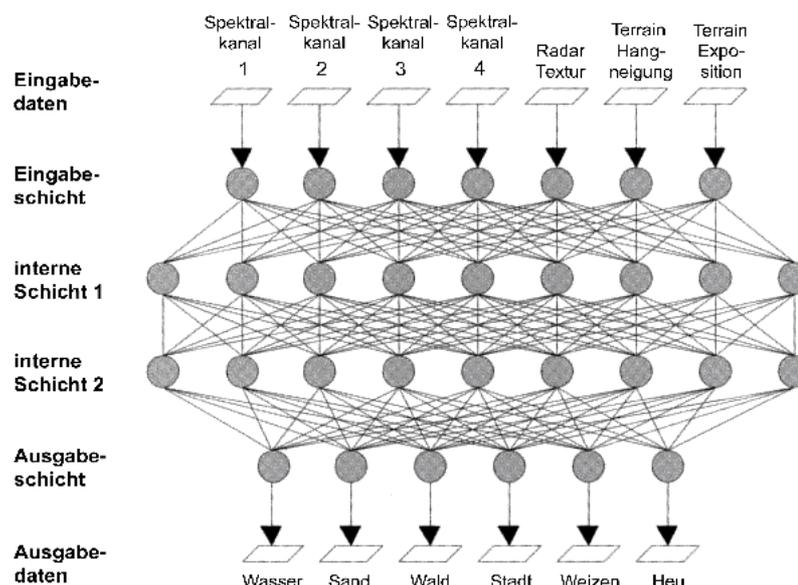


Abb. 4.6: Schematisierter Ablauf einer Klassifikation mit Hilfe eines Neuronales Netzwerks. Quelle: LILLESAND & KIEFER 1999, S. 591

Neuronale Netzwerke müssen trainiert werden, um den Prozeß des Selbstlernens zu fördern und abschließend ein erfolgreiches Konzept für eine Klassifikation zu erstellen. Hierzu wird das System mit bekannten Beispieldaten unter simulierten Routinebedingungen gespeist. Die Ergebnisse werden mit den erwarteten Resultaten verglichen und der Fehler aufgrund der Abweichungen berechnet. Dieser Fehler wird dann durch das Netzwerk zurücktransportiert („back-propagation“) und führt meist zu Modifikationen an den Gewichtungen. Das wird allgemein als „generalized delta rule“ nach RUMELHART et al. (1986, S. 318 ff.) bezeichnet (vgl. ATKINSON & TATNALL 1997, S. 701 ff.). Diese Rückwärtskorrektur erfolgt iterativ, bis der Fehler minimiert oder beseitigt ist. Über diesen Vorgang ist das NN in der Lage zu lernen. Fuzzyklassifikationen, semantische Informationen, Texturanalysen etc. sind in NNs implementierbar.

Die wichtigsten Vorteile der NN-Anwendung können wie folgt zusammengefaßt werden:

- Da alle Datentypen akzeptiert werden, ist dies vor allem für nicht normal verteilte Datensätze ein entscheidender Vorteil.
- NNs können generalisieren und über erlernte Klasseneigenschaften und Zugehörigkeiten weitere Klassen und deren Eigenschaften generieren.

Das Verfahren hat quantitativ gesehen wenige, dafür aber qualitativ betrachtet wesentliche Nachteile. Diese konzentrieren sich vor allem auf das Design eines Netzwerkes, dessen Entwicklung sehr arbeits- und zeitaufwendig sein kann sowie auf die zum Teil erheblichen Trainingszeiten. Die Forschungen zur Weiterentwicklung von NN werden vehement voran-

getrieben, um sie zukünftig effizient und zuverlässig einsetzbar zu machen (vgl. Sonderheft 4/1997 des „International Journal of Remote Sensing“).

#### Zu b) Klassifikation über **Expertensysteme**

Demgegenüber sind *Expertensysteme*, die oft auch als *wissensbasierte Systeme* bezeichnet werden, bereits besser erforscht und entwickelt und folglich effizienter einsetzbar.

Man kann Expertensysteme grob differenzieren in

- „top-down“- und
- „bottom-up“-Systeme.

Diese Unterscheidung folgt der Reihenfolge, in der die Hypothesen (gewünschte Ausgabeklassen) und die Konditionen (Eingangsdaten zur Charakterisierung von Klassen) bearbeitet werden.

#### „top-down“-Systeme (auch unter dem Stichwort Vorwärtsverkettung bekannt)

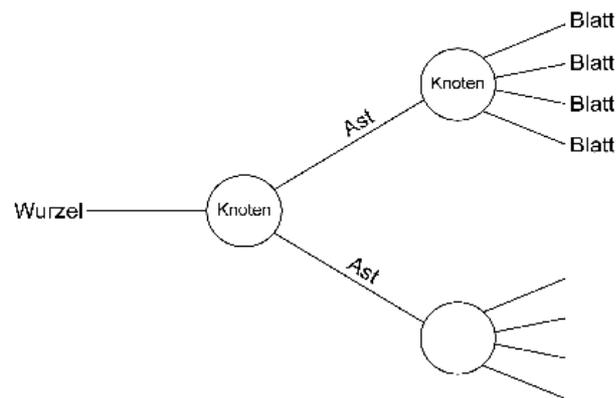
Jede Datenquelle/Kondition wird auf jede Hypothese - mit wechselndem Erfolg - angewendet/geprüft. Dabei muß mit Entscheidungsregeln festgelegt werden, ob, wann und wie eine Kondition tatsächlich (noch) angewendet wird (je nach Ergebnissen anderer Anwendungen von Konditionen), um eine Explosion der Rechenoperationen zu verhindern.

#### „bottom-up“-Systeme (auch unter dem Stichwort Rückwärtsverkettung bekannt)

Hier wird davon ausgegangen, daß jede Hypothese wahr ist bzw. die Klasse tatsächlich vorhanden und klassifizierbar ist. Anschließend werden die einer Klasse zugewiesenen Datenquellen bezüglich der Paßgenauigkeit ihrer Eigenschaften für diese Klasse geprüft (vgl. SKIDMORE 1989, S. 1452 f.).

Beide Ansätze - der erste mehr als der zweite - erfordern ein hierarchisches regelbasiertes Arbeiten. Häufig wird beim Aufbau und der Nutzung eines „top-down“-Expertensystems als das meistgenutzte mit folgender Fachterminologie gearbeitet:

- Ein Entscheidungsbaum wird entwickelt. Er beginnt bei der Wurzel (Ausgabeklasse), die ihre sehr allgemeinen Eigenschaften weiter nach unten vererbt. Dies geschieht über Entscheidungsäste, die sich an Entscheidungsknoten verzweigen und in „Charakter“-Blättern als unterster, speziellster Merkmalsstufe enden. Diesen Blättern werden die allgemein gehaltenen Eigenschaften der Ausgabeklasse von oben nach unten vererbt, und sie verfügen zudem über sehr spezielle Merkmale. Sie können untereinander - wie auch die Äste - gleichwertig vergesellschaftet oder hierarchisch strukturiert sein. Abbildung 4.7 verdeutlicht die Zusammenhänge.



**Entscheidungsbaum**

Abb. 4.7: Schematisierter Aufbau eines regelbasierten Expertensystems

Obwohl der Eindruck entsteht, daß von der Wurzel *nach oben* zu den Blättern gearbeitet/vererbt wird, wird dieser Ansatz als „top-down“-System bezeichnet, da die Merkmalsausprägungen vom Allgemeinen ins Spezielle übergehen (vgl. auch SKIDMORE 1989, S. 1452 f.; HESS 1992, S. 39).

Auch für Expertensysteme - wie schon für die NN - gilt, daß alle Datentypen sowie verschiedene Ansätze zur Optimierung der Klassifikationsgenauigkeiten implementiert und genutzt werden können.

Neben der großen Anzahl an Vorteilen, die denen der NN ähneln oder gleich sind, besteht ein hervorstechender Nachteil: Trotz besserer Nutzerorientierung z.B. durch die Trennung der Programmieroberfläche von der Benutzeroberfläche bleiben diese Systeme bisher Experten vorbehalten, da sie meist interne, speziellen Fragestellungen dienende komplexe Entwicklungen von Forschungsinstituten und Universitäten im Rahmen von Forschungsprojekten sind. Beispiele hierfür sind

- SPAM (McKEOWN et al. 1985, S. 570 ff.),
- LDIAS (Landsat Digital Image Analysis System, Canada Centre of Remote Sensing, CCRS, GOODENOUGH et al. 1987, S. 349 ff.),
- ICARE (Image Cartography Expert, Universität Toulouse/Frankreich, DESACHY et al. 1988, S. 518 ff.),
- RESEDA (Remote Sensor Data Analysis, Forschungsinstitut für anwendungsorientierte Wissensverarbeitung, FAW, Ulm, GÜNTHER & RIEKERT 1992, S. 9 ff.),
- ERNEST (NIEMANN et al. 1990, S. 883 ff.),
- AIDA: A System for the knowledge Based Interpretation of Remote Sensing Data (LIEDTKE et al. 1997, S. 313 ff.; vgl. auch die Übersichtsartikel von GOLDBERG et al. 1985, S. 1054 ff.; STOCK 1987, S. 9 f. sowie die Arbeit von GRAY & STOKOE 1988).

Diese Systeme sind für praxisorientierte Nutzer kaum verwendbar, da der Aufwand der Einarbeitung nicht im Verhältnis zu den Kosten und Ergebnissen steht. Kommerzielle Fernerkundungssoftwaresysteme bieten hierzu mittlerweile einige Lösungen an. So sind in EASI PACE verschiedene statistische Klassifikationsalgorithmen, ein NN-Klassifikator und ein Textur-Klassifikator implementiert. Im Rahmen des NN-Klassifikators können wohl Kollateraldaten zur Klassifizierung genutzt werden. Auch die GIS-Software IDRISI, die über

eine sehr gut ausgebaute Analyse von Fernerkundungsdaten verfügt, bietet Neuerungen an. Hier wurde der GIS-Bereich stark ausgebaut; über das Verfahren der „Multi-Criteria-Evaluation“ (MCE) können verschiedene GIS-Eingangsdaten zum einen auf ihre Qualität und Aussagekraft und zum anderen in vergleichenden Analysen auf eine bestimmte Fragestellung hin geprüft, selektiert und analysiert werden. Dieses Verfahren ist jedoch nicht an die Spektralklassifizierungen gekoppelt.

ERDAS Imagine 8.4 hingegen verfügt explizit über einen wissensbasierten Klassifikator („knowledge classifier“), der neben Informationen aus Fernerkundungsdaten eine Vielzahl zusätzlicher Informationen verschiedenster Datentypen wie z.B. GIS-Daten zuläßt. Da das Modul in Aufbau und Anwendungsmöglichkeiten besticht, wird es in dieser Studie genutzt.

#### Erstellung eines wissensbasierten Expertensystems mit ERDAS Imagine 8.4 - theoretischer Rahmen

Die Module „knowledge engineer“ (Aufbau und Organisation des wissensbasierten Systems) und „knowledge classifier“ (wissensbasierter Klassifikator) sind im Zuge der immer weiter verbesserten räumlichen Auflösung von Fernerkundungsdaten entstanden. Herkömmliche, sogenannte klassische Spektralklassifikatoren werfen bei der Klassifikation digitaler Luftbilddaten, flugzeuggestützter Scannerdaten oder hochauflösender Satellitenbilddaten wie z.B. IKONOS-Daten aufgrund der hohen Bodenauflösung der Daten Probleme auf (s.o.). Objektarten zeigen sich hier in der gesamten Variabilität ihrer Merkmalsausprägungen und verfügen folglich über sehr inhomogene Spektralsignaturen; dies unterwandert den klassischen Klassifikationsansatz.

Der wissensbasierte Klassifikator bietet – neben den erwähnten anderen Ansätzen - Möglichkeiten, die Klassifikationsgenauigkeit zu optimieren. Hierfür sind zum einen verschiedenste Datentypen wie

- Raster-, Vektor- oder skalare Daten,
- graphische Modelle aus dem Spatial Modeler in ERDAS Imagine - eine Makroprogrammiersprache - und
- nutzerdefinierte externe Programme

als Eingangsdaten integrierbar.

Zum anderen werden Ansätze zur Optimierung von Genauigkeiten angeboten wie

- Verbesserungen im Anschluß an eine Klassifikation („post-classification refinement“),
- GIS-Modellierungen,
- räumliche Operatoren zur Analyse von Nachbarschaftsbeziehungen und räumlicher Ausbreitung von Objekten und Objektarten,
- Einsatz von Konfidenzschwellenwerten zur Abschätzung von Irrtumswahrscheinlichkeiten bzw. Eintrittswahrscheinlichkeiten bei Klassenzuweisungen; zusätzlich hierzu kann der Fuzzyansatz als Option eingespeist werden, so daß als Ergebnis Grundlagen für Ent-

scheidungsprozesse vorliegen (s.o., [www.geosystems.de](http://www.geosystems.de): pdf-file: ERDAS Imagine 8.4: What's new?).

Ein weiterer wesentlicher Vorteil des wissensbasierten Systems in ERDAS Imagine 8.4 ist die Trennung von Experten- und Nutzerebene („knowledge engineer“ - „knowledge classifier“) sowie die Möglichkeit, ein einmal generiertes System transportabel/übertragbar und somit duplizierbar zu machen (vgl. Nachteile der anderen aufgeführten Expertenansätze). Das bedeutet, daß das System z.B. mit jeweils gleichartigen Eingangsdatentypen zu verschiedenen Untersuchungsarealen von der Nutzerseite gespeist werden kann, um dann ein in allen Aspekten vergleichbares Klassifikationsresultat zu erlangen, da die Konditionen identisch sind. Somit sind z.B. für Umweltschutzfragen Flächen mit Eignung für Industrie- und Gewerbeansiedlung für ein großes Gebiet mit einheitlicher naturräumlicher Prägung bzw. verschiedene Gebiete mit vergleichbarer naturräumlicher Ausstattung klassifizierbar und als Entscheidungsgrundlage nutzbar. Hierbei kann mit einer sogenannten Negativmaske (die durch Merkmalsparameter definiert ist) für Flächen, die z.B. für den Natur- und Umweltschutz vorgehalten werden, gearbeitet werden. Der Klassifikator kann dabei von fachfernen Nutzern ohne großen Arbeits- und Zeitaufwand nach einer kurzen Einarbeitungsphase genutzt werden, da der Experte das System zuvor erstellt hat; der fachferne Nutzer muß nur die Eingangsdaten definieren (Grenzen des Untersuchungsraums etc.). Schließlich ist eine Klassifikation über den „knowledge classifier“ nicht zwingend eine überwachte parametrische oder geometrische Klassifizierung; Genauigkeitskontrollen im Anschluß an die Klassifikation können je nach Spezifikationen entfallen (s.u.).

Das wissensbasierte hierarchische System, der „knowledge engineer“, ist dabei wie folgt strukturiert:

- Es folgt dem regelbasierten „top-down“-Ansatz (s.o.): eine Hypothese (Ausgabeklasse) vererbt ihre allgemeinen Merkmale bis hinunter zu der Ebene der Variablen (Eingangsdaten), die zudem über sehr spezielle Eigenschaften verfügen. Eine Hypothese ist jedoch erst dann verifiziert, wenn die Vorwärtsverkettung zutreffend ist. Ausgangspunkt sind die Variablen. Sie definieren die Regeln (Knoten) vor. Die Regeln legen dann die Ausgabeklassen fest ([www.geosystems.de](http://www.geosystems.de): pdf-file: ERDAS Imagine 8.4: What's new?; ERDAS Imagine online documentation: expert classifier).
- Über das Dialogfenster wird ein Entscheidungsbaum konzipiert, der sich zusammensetzt aus
  - Ausgabeklassen (Hypothesen), die allerdings auch als interne „Zwischen“-Hypothesen in der Hierarchie weiter unten eingesetzt werden können (vgl. Abb. 4.10), sowie aus
  - Regeln (Konditionen für die Variablen) und
  - aus Eingangsdaten/Variablen.

Aus den Variablen sind die verschiedenen Merkmalsausprägungen einer Klasse ableitbar. Bei der Entwicklung eines Baumes können die Regeln untereinander und mit internen Hypothesen kombiniert sowie die Variablen untereinander vergesellschaftet werden. Als Verknüpfungsmöglichkeiten stehen UND- oder ODER-Kombinationen zur Verfügung.

Andernfalls folgen die Kombinationen hierarchisch aufgebauten Vorgaben des Experten (s.u.).

- Die Spezifikationen von Klassenmerkmalen können zudem mit Konfidenzen/ Eintrittswahrscheinlichkeiten belegt werden, die sich - ausgehend von der Ebene der Variablen - bis zur Hypothesenebene fortpflanzen, wobei sie implementierten Algorithmen folgen (s.u.).

Der wissensbasierte Klassifikator, „knowledge classifier“, verfügt im Vergleich dazu über Dialogfenster mit verschiedenen Eingabeaufforderungen an den (fachfremden) Nutzer, die - als Teilergebnisse der Klassifizierungen - spezifische Zusatzinformationen zur Klassifikation liefern können (s.u.).

Der Umgang bzw. die Arbeitsweise mit den beiden Modulen wird im folgenden exemplarisch skizziert, wobei einzelne Funktionen, die wichtig und hilfreich erscheinen, hervorgehoben werden.

#### „knowledge engineer“:

- (1) Zusammenstellen der zu erwartenden/gewünschten Ausgabeklassen (z.B. bevorzugte Wohngebiete, Flächen für Industrieansiedlung);
- (2) Vorüberlegungen zur Charakterisierung der Hypothesen über die vorhandenen Variablen wie z.B. Spektralsignaturen in den vorhandenen Spektralkanälen, NDVI-Werte, Hangneigung und Exposition aus DGM-Daten etc.;
- (3) Festlegen der Regeln, die auf den Spezifikationen der Variablen basieren (vgl. Abb. 4.8);
- (4) Durchführen einer Testklassifikation aller oder ausgewählter Hypothesen aus dem Modul heraus;
- (5) Evaluierung der Testklassifikation z.B. gestützt durch den Pfadcursor („pathwaycursor“), der den jeweiligen Klassifikationsweg eines Pixels anzeigt. Gegebenenfalls wird eine Modifikation der Variablen oder der Regeln erforderlich; dann erfolgt eine wiederholte Testklassifikation (iteratives Vorgehen);
- (6) Sichern des generierten Expertensystems für weitere Anwendungen. Die abschließende Klassifizierung ist sowohl aus diesem Modul als auch aus dem Modul „knowledge classifier“ heraus durchführbar.

Bei der zuvor genannten Vorgehensweise sind insbesondere folgende Punkte zu beachten:

- auf der Ebene der Regeln sind unterschiedliche Kombinationen möglich (vgl. Abb. 4.8):

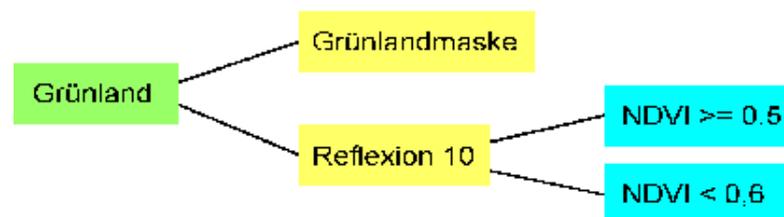


Abb. 4.8: Aufbau eines einfachen Entscheidungsbaumes im „knowledge engineer“. Quelle: ERDAS Imagine 8.4 online documentation: expert classifier, verändert

Hierbei können die Regeln „Grünlandmaske“ und „Reflexion 10“ alternativ erfüllt sein, um die Hypothese „bevorzugtes Wohngebiet“ zu verifizieren.

- Anders verhält es sich für den in Abb. 4.9 dokumentierten Fall:

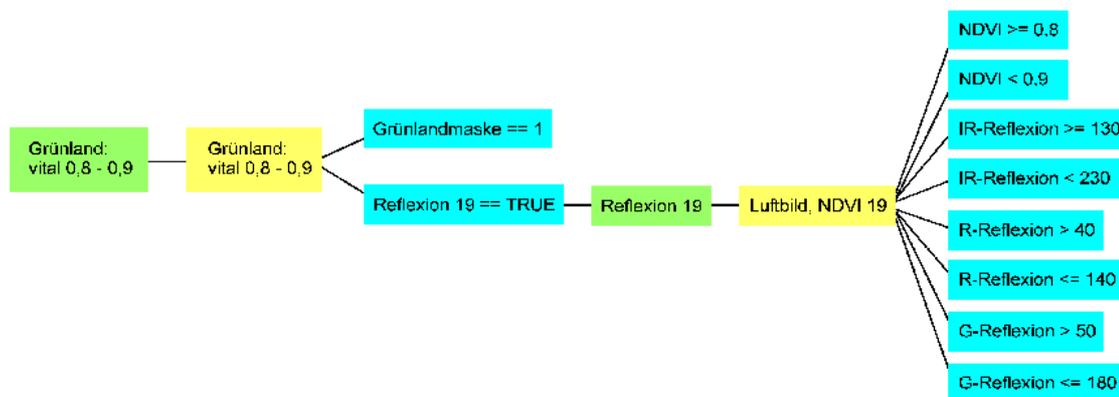


Abb. 4.9: Komplexe Struktur eines Entscheidungsbaumes im „knowledge engineer“. Quelle: ERDAS Imagine 8.4 online documentation: expert classifier, verändert

Hier müssen alle Variablenbedingungen erfüllt sein, damit eine Regel zutrifft und eine Hypothese verifiziert ist, also die erwartete Ausgabeklasse für ein Areal klassifiziert wird.

- Dies kann mit den zuvor angesprochenen Konfidenzgraden kombiniert werden, die sich von der Variablenebene (V) über die Regelebene (R) bis zur Hypothesenebene (H) durch folgende Algorithmen fortpflanzen (vgl. auch Abb. 4.10):

a) entlang des Entscheidungsastes

$$\prod_{i=0}^n c_i$$

b) Kombination mehrerer Äste über UND-Verknüpfungen

$$1 - \left[ \prod_{i=0}^n (1 - c_i) \right]$$

mit

- $c_i$  = Konfidenzwert des Knotens ( $i$ )
- $\prod c_i$  = Produkt der Konfidenzwerte
- $1 - c_i$  = Irrtumswahrscheinlichkeit bzw. Grad der Eintrittswahrscheinlichkeit
- $n$  = Anzahl der Knoten in einem Ast.

Abb. 4.10 verdeutlicht den Zusammenhang:

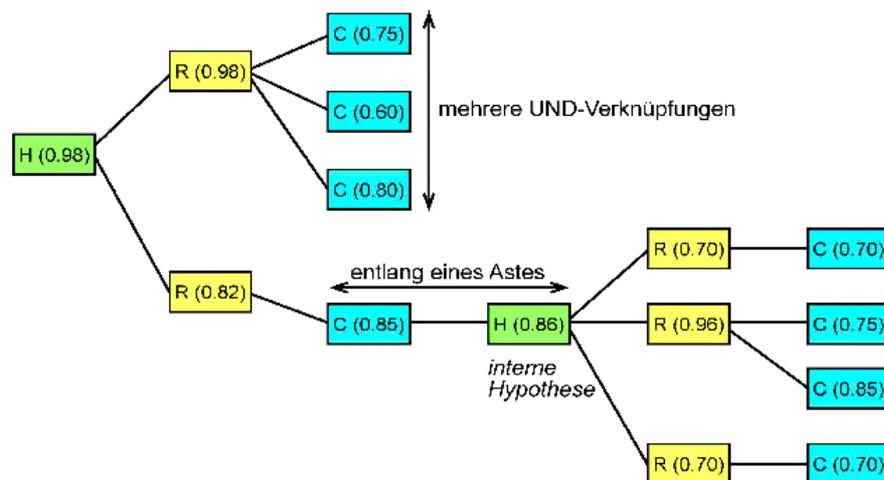


Abb. 4.10: Die Anwendung von Konfidenzwerten in verschiedenen Hierarchien eines Entscheidungsbaumes im „knowledge engineer“. Quelle: ERDAS Imagine 8.4 online documentation: expert classifier

Sobald der Experte Wahrscheinlichkeiten für Klassenzuweisungen von Pixeln festgelegt hat, ist eine Genauigkeitskontrolle der Klassifizierung erforderlich („accuracy assessment“). Diese Kontrolle entfällt, wenn ab der Variablenebene aufwärts mit einem Konfidenzwert von 100 % gearbeitet wird (zugleich „default“-Einstellung).

- Bei der Eingabe der Variablen bietet sich die Aktivierung der Befehlszeile „Prompt Analyst“ (annähernd interpretierbar als „Platzhalter“) an, um bei wechselnden Variablen - z.B. im Zuge eines übertragenen/duplizierten Expertensystems - die Gültigkeit von Entscheidungsbäumen zu erhalten.
- Um Rechenzeit zu sparen, sollten im Rahmen der Testklassifikation nur ausgewählte statt alle Klassen in die Klassifizierung eingespeist werden.
- Der Pfadcursor ist im Zusammenhang mit der Evaluierung der Testklassifikation ein zusätzliches Hilfsmittel, da er pixelorientiert den Entscheidungspfad angibt. Iterative Optimierungen werden dadurch leichter.
- Schließlich wird im Zuge des Testlaufs immer ein Konfidenzbild erzeugt, das bei der Festlegung verschiedener Konfidenzwerte in den Entscheidungsbäumen der jeweiligen Klassen im Zusammenhang mit den vorgestellten Algorithmen pixelorientiert Informationen über Zuordnungswahrscheinlichkeiten bereitstellt (ERDAS Imagine 8.4 online documentation: expert classifier).

Bei der Nutzung des Moduls „*knowledge classifier*“ bieten sich folgende Funktionen an bzw. sollten folgende Anwendungsmöglichkeiten beachtet werden:

- (1) Zunächst ist ein vorhandenes wissensbasiertes System auszuwählen, das der Klassifizierung zugrunde liegen soll.
- (2) Dann sind einzelne Hypothesen für die Klassifikation selektierbar, falls nicht alle Klassen im Ergebnisbild gewünscht sind.
- (3) Daraufhin kann der Nutzer nochmals die Eingangsdaten prüfen und gegebenenfalls ändern.

- (4) Falls z.B. im Zusammenhang mit der Platzhalterfunktion die Eingabe von Variablen vergessen wurde, werden diese im nächsten Schritt vom System nachgefragt.
- (5) Schließlich stehen mehrere Ausgabeoptionen zur Verfügung:
- über die Rangfolge und Anzahl der Rangfolge unter der Funktion „Best Class per Pixel“ sind je nach eingesetzten Konfidenzen mehrere Klassifikationsergebnisse in der Reihenfolge der Klassengenauigkeit pro Pixel einforderbar (hohe bis geringe Genauigkeit); dies führt zu mehreren Ergebnissen; diese werden dann dem Entscheidungsprozeß des Nutzers zugeführt; hierzu sollte stets das schon erwähnte Konfidenzbild erstellt und zu Analysezwecken herangezogen werden.
  - Auch hier ist ein Pfadcursor-Bild generierbar, um pixelorientiert die Entscheidungsbäume aufzuzeigen.
  - Schließlich kann die Pixelgröße des Ausgabebildes variiert werden, so daß sie z.B. auf die kleinste Pixelgröße der verschiedenen Eingangsdaten angepaßt wird. Zudem verarbeitet der Klassifikator Daten unterschiedlicher Kartenprojektionen; folglich kann eine Projektionsart für das Ergebnisbild festgelegt werden.

Die Klassifikation erfolgt dann auf Basis der Spezifikationen bzw. Konditionen und nicht zwingend - wie bereits erwähnt - als überwachte Klassifizierung.

#### Erstellung eines wissensbasierten Expertensystems und Durchführung der Klassifikation

Alle Möglichkeiten des wissensbasierten Klassifikationsansatzes in ERDAS Imagine 8.4 anzuwenden würde nicht nur den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen. Es ist nicht im Sinne der gegebenen Fragestellungen, da Effizienz und Kostenminimierung neben der Optimierung des Arbeitsprozesses und der Qualität der Ergebnisse wichtige Teilziele sind. Demzufolge werden die Module „knowledge engineer“ und „knowledge classifier“ nur in Teilbereichen genutzt (vgl. unten).

Als Eingangsdaten dienen

- die Spektralkanäle der z.T. vorprozessierten Fernerkundungsdaten (Atmosphärenkorrektur, Reduktion auf relevante Spektralkanäle),
- die NDVI-Bilder bzw. das RG-Indexbild zu den jeweiligen Zeitschnitten, die über das Verfahren der Äquidensitenbildung vorstratifiziert bzw. vorklassifiziert sind,
- die manuelle Landnutzungskartierung auf Basis der DGK-5-Blätter (s.o.),
- die ATKIS-Daten (s.o).

Weitere Eingangsdaten wie z.B. DGM-Daten sind aufgrund der schwachen Reliefierung des Geländes nicht erforderlich.

Da im Mittelpunkt der Untersuchungen die Vegetation in ihrer Verteilung und in ihren Vitalitätsgraden steht, konzentrieren sich die Klassifikationen ebenfalls vordringlich auf die Vegetation. Hierzu werden die einzelnen NDVI-Bilder und das RG-Indexbild zur Charakterisierung der Vitalitätsgrade neben den Spektralsignaturen in den einzelnen Spektralkanälen als Zusatzinformationen herangezogen und in die Klassifikation

eingespeist. Die Rasterdatenmasken, die aus der Landnutzungskartierung für die Luftbilddatensätze und aus den konvertierten ATKIS-Daten generiert sind, dienen im Zuge der Klassifikation der Bildsegmentation, um spektral schwer zu trennende Klassen (z.B. Nadelwald und Wasserflächen) aufgrund ihres Spektralverhaltens und ihrer Vitalitätsgrade klassifizieren zu können.

Dabei werden die Vitalitätsgrade je nach Objektart/angestrebter Ausgabeklasse unterschiedlich differenziert. So werden für Klassen, die nicht vegetationsdominiert sind, wie z.B. Straßenflächen oder Wohnbauflächen, Schwellenwerte für das Vorhandensein von Vegetation aufgrund des jeweiligen NDVI-Bildes festgesetzt. Die diagnostizierte Vegetation wird für diese Klassen nicht weiter nach Vitalitätsgraden analysiert.

Für Objektarten hingegen, die durch Vegetation dominiert sind, wie z.B. Wald- oder Grünlandflächen, werden soweit wie möglich unterschiedliche Vitalitätsgrade der Vegetation festgelegt (Ausnahme: Luftbildmosaik von 1990, hier Grad der „Grünheit“). Denn diese Klassen sind Bestandteil der Veränderungsanalysen, da sie in ihrer Ausprägung und Verteilung wichtige Veränderungen aufzeigen können. Daß die Vitalitätsgrade gerade auch in der Ausgabeklasse „Ackerflächen“ aufgrund der jeweiligen Anbauprodukte sehr stark schwanken können und keine Auskünfte über sonstige Entwicklungen geben (Ausbreitung, Zustand etc.), wird dabei berücksichtigt. Zugleich werden die geometrischen Paßgenauigkeiten der Rasterdatenmasken wie auch die Aktualität der Zuweisungen der Landnutzungen und der Objektarten analysiert. Die wissensbasierten Systeme, die monotonalen Klassifizierungen wie auch die Veränderungsanalysen werden in Kapitel 5.1 behandelt.

#### 4.2.4 Techniken der Veränderungsanalyse - theoretischer Hintergrund und Vorstellung eingesetzter Verfahren

##### Theoretischer Hintergrund

Für fernerkundungsbasierte Monitoring- bzw. Veränderungsanalysen („change detection analysis“) steht eine Vielzahl von Techniken zur Verfügung (weiterführend hierzu: LUNETTA & ELVIDGE 1998, S. 21 ff.; WASHINGTON-ALLEN et al. 1998, S. 1326; JENSEN 1996, S. 262 ff.; SINGH 1989, S. 993; DERENYI & YAZDANI 1982, S. 749):

- (a) Abgrenzung signifikanter Differenzen gleicher Spektralkanäle unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte;
- (b) konventionelle überwachte oder unüberwachte Klassifizierung nur eines künstlich hergestellten Datensatzes, der aus allen Untersuchungszeitpunkten generiert wird;
- (c) „Bildalgebra“: Ratiobildung von gleichen Spektralkanälen zweier Bilder, HKT-bildung oder Subtraktion dieser Kanäle etc.; Anwendung dieser Techniken auf (Vegetations-) Indexbilder verschiedener Zeitpunkte;
- (d) Bildregression der verschiedenen Zeitschnitte;
- (e) Vergleich von unabhängig durchgeführten Einzelbildklassifikationen;

- (f) Erstellung von binären Masken zur Isolation von Veränderungsbereichen;
- (g) Nutzung von Kollateraldaten wie z.B. Topographische Karten als Referenzdatensatz im Rahmen der fernerkundlichen Analyse;
- (h) visuelle, vergleichende Bildschirmanalyse;
- (i) Analyse über den spektralen Veränderungsvektor („spectral change vector analysis“);
- (j) wissensbasierte, rechnergestützte Veränderungsanalysen.

Zu (a) Abgrenzung signifikanter Differenzen gleicher Spektralkanäle unterschiedlicher Aufnahmezeitpunkte

Im Zuge dieser Technik werden gleiche Spektralkanäle von Szenen mit unterschiedlichen Aufnahmedaten farbig kodiert (z.B. grün, rot) und in einem neuen Datensatz zusammengefügt. Die Veränderungen zwischen den Untersuchungszeitpunkten sind über Mischfarben der beiden Eingangsdatensätze in einem dritten, neuen Kanal ablesbar (Schattierungen von gelb). Ein Vorteil liegt darin, daß auch mehr als nur zwei Zeitpunkte analysierbar sind. Nachteilig wirkt sich jedoch aus, daß die eingetretenen Veränderungen schwer zu charakterisieren (Zu- oder Abnahme einer Merkmalsausprägung) und folglich kaum zu quantifizieren sind (vgl. auch JENSEN 1996, S. 265 f.).

Zu (b) konventionelle überwachte oder unüberwachte Klassifizierung nur eines künstlich hergestellten Datensatzes, der aus allen Untersuchungszeitpunkten generiert wird

Bei diesem Verfahren werden die Datensätze in einem neu generierten Datensatz zusammengefügt. Das heißt, daß z.B. zwei Landsat TM-Szenen in einen neuen 14-kanaligen Datensatz integriert werden. Anschließend wird dieser Datensatz einer konventionellen Klassifizierung unterzogen.

Diese Technik erfordert nur eine einzige Klassifikation, die jedoch so komplex ist, daß sie viele Fehlerquellen birgt: einige Spektralkanäle liefern z.B. redundante Informationen, in anderen Kanälen sind Veränderungen aufgrund der Spektralsignaturen nicht zu erkennen. Sowohl für Bereiche, in denen keine Veränderungen stattfanden, als auch für Bereiche, in denen Veränderungen geschehen sind, müssen Trainingsgebiete erstellt werden (inkl. Genauigkeitskontrolle der Klassifikation). Eine Abgrenzung zwischen den Kategorien „verändert“ und „unverändert“ kann problematisch werden (siehe auch MICKELSON et al. 1998, S. 894 f.; JENSEN 1996, S. 266; SINGH 1989, S. 996 f.).

Zu (c) „Bildalgebra“: Ratiobildung von gleichen Spektralkanälen zweier Bilder, HKT-Bildung oder Subtraktion dieser Kanäle etc.; Anwendung dieser Techniken auf (Vegetations-) Indexbilder verschiedener Zeitpunkte

Die unter dem Stichwort „Bildalgebra“ zusammengefaßten Techniken konzentrieren sich aufgrund der gehäuften Anwendung nur einiger der Techniken auf

- die Subtraktion von gleichen Spektralkanälen,
- die Ratiobildung von gleichen Spektralkanälen,
- die HKT gleicher Spektralkanäle,
- die Subtraktion und Ratiobildung von Vegetationsindexbildern

der verschiedenen Aufnahmezeitpunkte.

Bei der Subtraktion wie auch bei der Ratiobildung weisen die Extrembereiche der Histogramme der Ergebnisbilder auf positive oder negative Veränderungen hin (Maximum, Minimum). Die Bereiche des Histogramms, die laut Nutzer Veränderungen signalisieren, sind über Schwellenwertmethoden (i.d.R. STA) isolierbar (vgl. Abb. 4.11). Problematisch ist hierbei die Festsetzung des jeweiligen Schwellenwertes, die in der Literatur vielfach diskutiert wird (weiterführend hierzu: MACLEOD & CONGALTON 1998, S. 209; SUNAR 1998, S. 225 ff.; GUERRA et al. 1998, S. 2068; WASHINGTON-ALLEN et al. 1998, S. 1326; LYON et al. 1998, S. 143 f.; SINGH 1989, S. 990 f.; DERENYI & YAZDANI 1982, S. 749).

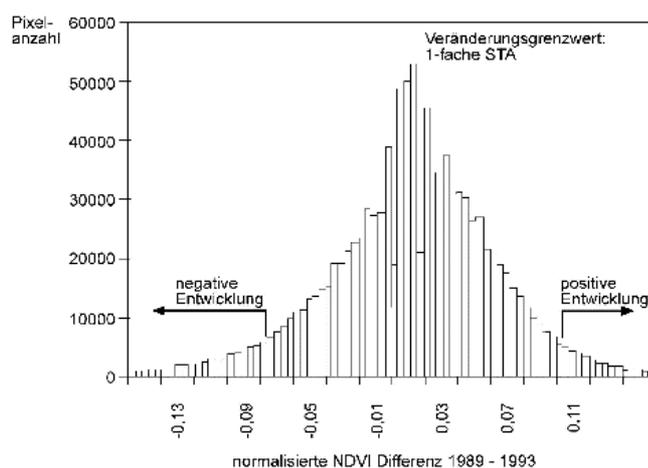


Abb. 4.11: Ergebnishistogramm einer Ratiobildung zweier NDVI-Bilder. Quelle: GUERRA et al. 1998, S. 2068, verändert

Dieser Ansatz ist außerdem gegenüber Lagefehlern und Mischpixelbildung äußerst empfindlich (Veränderung der DNs durch das „Resampling“). Eine Quantifizierung der Veränderungen ist demnach kritisch. Dies gilt vor allem dann, wenn Veränderungen in Grenzbereichen verschiedener Nutzungsarten angezeigt werden. Hier kommt es durch Lagefehler und veränderte Mischspektralinformationen zu Fehleinschätzungen der Veränderungen (vgl. SINGH 1989, S. 993).

Eine Variante der oben genannten Methodik bietet die Nutzung der HKT. Sie dient der Reduktion der Bildinformationen auf wesentliche, Veränderungen anzeigende Bildinhalte, da redundante Informationen eliminiert werden. Im weiteren Verlauf der Analyse werden sie entsprechend der Methode verarbeitet (vgl. auch ABUELGASIM et al. 1999, S. 209; WEIERS 1999, S. 86; MACLEOD & CONGALTON 1998, S. 210; KWARTENG & CHAVEZ 1998, S. 1654; SINGH 1989, S. 995).

#### Zu (d) Bildregression der verschiedenen Zeitschnitte

Im Zuge dieser Technik wird eine Regressionsanalyse gleicher Spektralkanäle verschiedener Zeitpunkte durchgeführt. Pixel, die aufgrund ihrer Grauwerte Veränderungen anzeigen, werden durch die Festsetzung von Schwellenwerten von Pixeln, die keine wesentlichen Grauwertveränderungen aufweisen, abgegrenzt. Zur Festlegung der Werte werden die Mittelwertbildung und die Standardabweichung hinzugezogen (vgl. SINGH 1989, S. 993).

#### Zu (e) Vergleich von unabhängig durchgeführten Einzelbildklassifikationen

Hier werden pro Fernerkundungsdatensatz Einzelbildklassifikationen durchgeführt (z.B. zwei Zeitpunkte). Die beiden Ergebnisbilder können dann vergleichenden pixelbasierten Analysen unterzogen werden. Nachteilig wirkt sich hierbei aus, daß Fehlklassifikationen der konventionellen Klassifikationsverfahren die Resultate der Vergleiche beeinflussen. Hierdurch können die Klassifikationsfehler weitergegeben und multipliziert werden.

Geht man jedoch davon aus, daß die Einzelbildklassifikationen zuverlässig sind, so liegt der entscheidende Vorteil darin, daß die einzelnen Szenen nicht (aufeinander) kalibriert werden müssen. Eine - zum Teil - recht aufwendige Datenvorprozessierung wie z.B. die Atmosphärenkorrektur kann gegebenenfalls entfallen.

Hierbei kann auch - im Gegensatz zu den bisher aufgeführten Techniken - analysiert werden, inwieweit ein Nutzungswechsel für ein Areal tatsächlich stattgefunden hat. Dadurch, daß die Klassifikationen unabhängig voneinander erfolgen, ist eine Bindung an Kategorien/Klassenzugehörigkeit über die gesamten Zeitschnitte hinweg (wie z.B. beim Multidatenansatz unter (b)) nicht gegeben. Der Nutzer hat eine andere Ausgangsbasis und kann diese Wechsel besser erkennen. So können zusätzlich zu Veränderungsanalysen innerhalb einer Klasse (z.B. Vitalitätsgrade von Laubwaldflächen) Untersuchungen zu Kategorie-/Klassenwechseln (Laubwald zu Ackerfläche) durchgeführt werden (s.u.; vgl. auch MACLEOD & CONGALTON 1998, S. 209; HÄME et al. 1998, S. 1080; JENSEN 1996, S. 269; SINGH 1989, S. 996 f.).

#### Zu (f) Erstellung von binären Masken zur Isolation von Veränderungsbereichen

Im Zuge dieser Technik werden die Daten wie folgt bearbeitet:

- (1) Zunächst wird der als Referenzbild gewählte Fernerkundungsdatensatz konventionell klassifiziert.
- (2) Danach wird aus jeweils gleichen Spektralkanälen zweier Zeitpunkte ein neuer zweikanaliger Datensatz erstellt.
- (3) Aus diesem Datensatz werden mit Hilfe von Bildalgebrafunktionen Veränderungsbereiche isoliert.
- (4) Hieraus wird eine binäre Maske generiert, die nur Bereiche, in denen Veränderungen stattgefunden haben, anzeigt.

- (5) Mit dieser Maske werden in dem Bild vom zweiten Zeitpunkt nur die Flächen extrahiert, die sich gewandelt haben.
- (6) Für diese Areale wird schließlich die konventionelle Klassifikation durchgeführt. Die beiden Einzelbildklassifikationen werden abschließend vergleichend untersucht (s.o.).

Durch diese Technik können die Datenmengen und der Arbeitsaufwand erheblich reduziert werden (vgl. MILLER et al. 1998, S. 253 f.; JENSEN 1996, S. 270). Allerdings liegt der Schwachpunkt auch hier wieder in der Festsetzung des Schwellenwerts zur Abgrenzung der Kategorien „unverändert“ und „verändert“.

Zu (g), (h), (j) Nutzung von Kollateraldaten wie z.B. Topographischen Karten als Referenzdatensatz im Rahmen der fernerkundlichen Analyse; visuelle, vergleichende Bildschirmanalyse; wissensbasierte, rechnergestützte Veränderungsanalysen

Für diese Techniken gelten ähnliche Bedingungen wie für die Einzelbildklassifikation. Bei der Nutzung von Kollateraldaten als Referenzbild hängt die Ergebnisqualität entscheidend von der Richtigkeit und Genauigkeit der Referenzdaten ab. Für wissensbasierte rechnergestützte Veränderungsanalysen herrscht zur Zeit noch großer Forschungsbedarf; Routineanwendungen hierzu gibt es noch nicht (vgl. JENSEN 1996, S. 270 f.).

Zu (i) Analyse über den spektralen Veränderungsvektor

Bei der Analyse über den spektralen Veränderungsvektor werden Datensätze zweier Zeitpunkte kanalweise untersucht. Hierzu wird ein zwei- bis mehrdimensionaler Merkmalsraum aufgespannt, wobei für Zeitpunkt a und b die Grauwerte der Pixel mit ihren jeweiligen Koordinaten  $x_a/y_a$  und  $x_b/y_b$  abgetragen werden.

Die Stärke der Veränderung wird über die Euklidische Distanz zwischen den zwei Koordinatenpunkten desselben Pixels bemessen (die Länge des Vektors; vgl. Abb. 4.12). Ob dieser Grauwertwechsel als Veränderung diagnostiziert wird oder nicht, hängt von der nutzerdefinierten Festsetzung der Schwellenwerte ab (vgl. Abb. 4.12). Über den Veränderungsvektor kann abgeleitet werden, ob der Wechsel durch Zu- oder Abnahme von Merkmalsausprägungen hervorgerufen wird (z.B. Rodung bzw. Aufforstung von Waldarealen: Ab- bzw. Zunahme von Reflexion je nach Spektralkanal).

Dieses Verfahren kann nicht nur auf die einzelnen Spektralkanäle der Datensätze angewendet werden, sondern auch auf abgeleitete Größen wie „Grünheit“ (greenness) oder „Helligkeit“ (brightness) im Rahmen der „tasseled-cap“-Analyse nach KAUTH & THOMAS (1976) (siehe auch HÄME et al. 1998, S. 1080; JENSEN 1996, S. 275 f.; SINGH 1989, S. 997).

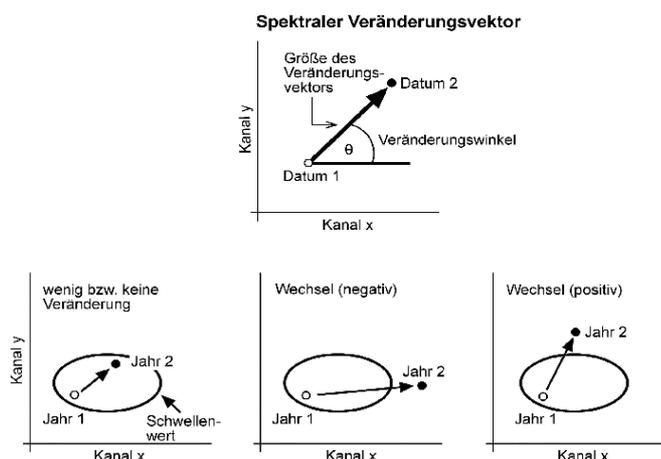


Abb. 4.12: Schematisierte Darstellung der Analyse über den spektralen Veränderungsvektor. Quelle: JENSEN 1996, S. 276

Für die Anwendung der einzelnen Techniken sollten die im folgenden aufgeführten Voraussetzungen erfüllt sein. Der Katalog orientiert sich an idealen Bedingungen, die in der Praxis immer angestrebt werden sollten.

a) Sensorbedingte Charakteristiken:

- *Temporale Auflösung:* Aufnahmen aus verschiedenen Jahren sollten jahreszeitlich möglichst nah beieinander liegen; idealerweise sollten nur Datensätze jeweils des gleichen Datums untersucht werden;
- *Räumliche Auflösung und Aufnahmewinkel:* Die Bodenauflösung in verschiedenen Aufnahmen sollte möglichst gleich oder ähnlich sein. Die Lagefehler der Geocodierung sollten unter einem halben Pixel liegen. Je nach Sensorcharakteristiken entstehen in der Aufzeichnung sehr große geometrische und radiometrische Unterschiede, so daß vergleichende Untersuchungen aufgrund der Bildeigenschaften nicht möglich sind. Hier sollten einheitliche Bedingungen angestrebt werden (z.B. jeweils identische Satellitenbildszenen statt benachbarter).
- *Spektrale Auflösung:* Idealerweise sollten für multitemporale Analysen Aufnahmen jeweils des gleichen Sensors benutzt werden, um eine einheitliche, vergleichbare spektrale Auflösung zu gewährleisten. Ist dies nicht möglich, so muß man auf Daten von Sensoren ähnlicher spektraler Auflösung zurückgreifen.
- *Radiometrische Auflösung:* Hier gilt ebenfalls, daß die Daten unterschiedlicher Zeitpunkte eine gleiche radiometrische Auflösung (z.B. 8, 16 bit) aufweisen sollten. In Ausnahmefällen können Daten mit geringerer Bitauflösung auf die höhere Auflösung der Referenzdaten gestreckt werden. Der Informationsgehalt wird dadurch nicht erhöht; die Daten werden jedoch bedingt vergleichbar (vgl. SUNAR 1998, S. 225; JENSEN 1996, S. 262 f.).

b) Umwelteinflüsse:

- *Atmosphärenbedingungen:* Da der Zustand der Atmosphäre zu verschiedenen Aufnahmezeitpunkten variiert, sollte - zumindest bei Satellitenbilddaten - eine Atmosphärenkorrektur durchgeführt werden, um die Daten vergleichend auswerten zu können (vgl. Kap. 3.2). Falls dies nicht möglich ist, sollte zumindest eine Histogrammanpassung (radiometrische Harmonisierung) der Bilder auf ein Referenzbild vorgenommen werden.
- *Phänologie:* Die Entwicklungsstadien der Vegetation korrelieren sehr eng mit den Jahreszeiten. Einzelne Pflanzenarten weisen hierbei individuelle Zyklen auf. Bei einer Monitoringaufgabe, die sich z.B. auf eine Pflanzenart konzentriert, muß die Phänologie in die Planung von Beobachtungszeitpunkten einbezogen

werden. Zudem muß geprüft werden, welche Sensorcharakteristiken günstig für die Aufzeichnung von Veränderungen sind.

Neben den genannten Einflüssen, die entscheidend auf die Qualität der Daten für ein Monitoring wirken, sind weitere Parameter wie die oberflächennahe Bodenbeschaffenheit z.B. infolge von Niederschlagsereignissen oder Bodenbearbeitungen sowie Wasserstände an Gezeitenküsten etc. zu beachten (vgl. JENSEN 1996, S. 259 ff.).

Auch für die vorliegende Arbeit erfüllen die verfügbaren Fernerkundungsdaten bei weitem nicht die idealen Voraussetzungen für ein Monitoring. Zwar sind die Satellitenbildszenen atmosphärenkorrigiert und die Mehrzahl der Szenen ist mit demselben Sensor aufgenommen, jedoch differieren die Aufnahmezeitpunkte zwischen den Jahren 1986 und 1991 um ca. zwei Monate (Mai, Juli). Zugleich sind dies sehr aktive phänologische Phasen. Dieser Zeitunterschied ist folglich nicht unproblematisch.

Die Luftbildmosaike von 1985 und 1990 hingegen sind mit verschiedenen Aufnahmesystemen generiert worden und zeigen für die Originaldatensätze sehr große Unterschiede in der Bodenauflösung, Geometrie sowie der Radiometrie. Probleme durch unterschiedliches Reflexionsverhalten in Mitlicht- und Gegenlichtbereichen können im Zuge der Mosaikierung nicht vollständig eliminiert werden und beeinflussen die Klassifizierungen (vgl. Kap. 3.1).

Da diese oder ähnliche Umstände in der Praxis jedoch immer wieder auftreten, werden die Daten trotz dieser Mängel für ein fernerkundlich gestütztes Monitoring eingesetzt. Hieraus werden Handlungsanweisungen für die Praxis abgeleitet.

Allen vorgestellten Monitoringtechniken gemeinsam - natürlich mit unterschiedlicher Gewichtung - sind folgende Problematiken:

- Analysefehler durch Lagefehler (fehlerbehaftete Geocodierung),
- Ungenauigkeiten in der Quantifizierung von Veränderungen,
- Festsetzung von Schwellenwerten für die Abgrenzung der Kategorien „unverändert“ und „verändert“,
- Zuordnung einer Veränderung zu der Kategorie
  - Variation innerhalb einer Landbedeckungs- bzw. Landnutzungsklasse,
  - Wechsel der Landbedeckungs- bzw. Landnutzungsklasse.

Um den Einfluß von Lagefehlern zu minimieren und folglich die Quantifizierung von Veränderungen zu optimieren, werden häufig Glättungsfiler benutzt (vgl. MILLER et al. 1998, S. 252; SINGH 1989, S. 999). Hiermit soll gerade in Grenzbereichen zwischen verschiedenen Kategorien die Mischpixelproblematik und damit die Unsicherheit der Zuordnung zu Klassen reduziert werden. Allerdings gibt es auch Ansätze, in denen über die Festsetzung von Schwellenwerten versucht wird, mit Lagefehlern behaftete Bereiche der Kategorie „unverändert“ zuzuweisen (vgl. Abb. 4.11). Die Empfehlungen schwanken zwischen  $\pm 1$ - und  $\pm 3$ -facher STA, so daß Veränderungen erst ab größeren Standard-

abweichungen als solche auch diagnostiziert werden (WASHINGTON-ALLEN et al. 1998, S. 1326).

Die Festsetzung von Grenzwerten über die Definition von STA ist ein gängiges Verfahren, wobei die Werte in der Regel empirisch festgelegt werden. GUERRA et al. (1998) empfehlen hierzu die Festsetzung auf eine STA von  $\pm 1$  als Grenze zwischen den Kategorien „unverändert“ und „verändert“. Dies korrespondiert mit dem Wert von WASHINGTON-ALLEN et al. (1998), so daß auch hier Einflüsse durch Lagefehler ausgeschaltet werden (GUERRA et al. 1998, S. 2069).

Schwierig ist je nach angewandter Technik nicht nur die Zuordnung einer Veränderung zu den Kategorien „Variation“ (innerhalb einer Kategorie/Klasse) oder „Wechsel“ (von einer Kategorie/Klasse zur anderen). Zum Teil kann mit den Techniken nur festgestellt werden, daß eine Veränderung stattgefunden hat, ohne daß Angaben über die Richtung (mehr-weniger) gemacht werden können. Einige Techniken wie z.B. die Analyse über den spektralen Veränderungsvektor können hierüber jedoch Auskunft geben. Allerdings ist es nach wie vor problematisch, einen Kategoriewechsel zu diagnostizieren.

Die Techniken können grundsätzlich nur Variationen von Eigenschaften einer vordefinierten Klasse extrahieren. Dies kann durch Modifikationen einzelner Verfahren (z.B. Vergleich unabhängiger Einzelbildklassifikationen) zum Teil erweitert/verbessert werden. Der Festlegung von Schwellenwerten kommt hierbei eine Schlüsselrolle zu. Schließlich werden zumeist nur Kollateralquellen oder Geländeuntersuchungen klären können, ob einer diagnostizierten Veränderung wirklich auch ein Klassenwechsel zugrunde liegt (vgl. ABUELGASIM et al. 1999, S. 208 ff.).

Aus den vorgestellten Verfahren zur Veränderungsanalyse wird ein modifizierter Ansatz für die vorliegende Arbeit entwickelt, um die verschiedenen Nachteile der Verfahren weitestgehend zu eliminieren. Die Modifikationen beziehen sich dabei zum einen auf den Klassifikationsansatz und zum anderen auf das Verfahren der Veränderungsanalyse. Zunächst werden gemäß Punkt e) zwei Einzelbildklassifikationen durchgeführt. Die Modifikation besteht darin, daß auf den wissensbasierten Klassifikationsansatz zurückgegriffen wird, statt konventionelle Klassifikationsansätze zu nutzen. Diese Einzelbildklassifikationen werden dann im Modul „change detection“ der Software ERDAS Imagine einer Analyse unterzogen, die ursprünglich auf Bildalgebrafunktionen basieren soll (vgl. Punkt c)). Diese Algebrafunktionen werden jedoch nicht genutzt, da das Modul - wie die detaillierte Beschreibung weiter unten zeigt - „zweckentfremdet“ wird.

Die Modifikationen bieten neben wenigen Schwächen diverse Vorteile.

Schwächen:

- Fehlklassifizierungen treten auch bei der Nutzung des wissensbasierten Klassifikators vereinzelt auf und beeinflussen die Veränderungsanalyse. Aufgrund der sehr deutlichen Fehlerrisikoprägungen der Fehlklassifizierungen sind diese jedoch schon rein visuell leicht zu isolieren. Ein Beispiel hierfür sind Hausdächer im CIR-Luftbildmosaik, die bedingt

durch das Baumaterial oder durch den Winkel zur Sonneneinstrahlung falsch als verschattete Bereiche klassifiziert werden (vgl. Fehlerdiskussion Kap. 6).

- Im Zuge der Verbesserung der Detailschärfe über die einfache Pixelvervielfachung wird die Pixelgröße der einzelnen Satellitenbildszenen auf 10 m Pixelkantenlänge und die des Color-Luftbildmosaiks auf 0,4 m Kantenlänge „herunter transformiert“ (vgl. Kap. 3.2). Dadurch werden die Daten geglättet, zugleich die Detailerkennbarkeit erhöht und die Lagegenauigkeit von Objekten verbessert. Durch diese Modifikationen werden die Grauwerte jedoch zum Teil soweit verfälscht, daß in der Folge die Berechnung der Indizes wie auch die Ergebnisse der wissensbasierten Klassifikation minimal fehlerbehaftet sind. Vor allem linienhafte Strukturen wie z.B. der Verlauf der Lippe sind davon betroffen. In den Satellitenbildausschnitten wirkt sich die Mischpixelproblematik trotz der verringerten Pixelgröße für diesen Bereich negativ aus, da durch die verwendeten Algorithmen auch Wasserflächen schließlich als „vegetationsbestandene“ Flächen ausgewiesen werden (vgl. Kap. 3.2). Davon sind ausschließlich die Satellitenbildausschnitte betroffen. Insgesamt ist die verbesserte Detailschärfe jedoch von großem Vorteil, da hierdurch eine flächenhafte Homogenisierung/Glättung für die einzelnen Landnutzungen bzw. -bedeckungen erreicht wird. Dies wirkt sich in Kombination mit der verbesserten Lagegenauigkeit positiv auf die Spektralklassifizierungen und die Veränderungsanalysen aus.
- Auch die hier angewandte Veränderungsanalyse ist gegenüber Lagefehlern empfindlich (s.o.). Dies wirkt sich vor allem für die Analysen der Satellitenbildausschnitte für einige Flächen negativ aus, während die Luftbildmosaike davon kaum betroffen sind. Obwohl die RMS-Fehler der einzelnen Geocodierungen sehr gering sind (vgl. Kap. 3.2), werden für einige Bereiche die Lagefehler in den Ergebniskarten der Veränderungsanalysen aufgrund ihrer Regelmäßigkeit schon rein visuell abgrenzbar (vgl. Fehlerdiskussion Kap. 6).

Die Vorteile der in ERDAS Imagine implementierten und modifizierten Technik wiegen die Schwachpunkte jedoch auf:

- Im Vergleich zu einigen der oben beschriebenen Techniken der Veränderungsanalysen tritt das Problem der Schwellenwertfestsetzung zur Diagnose von Veränderungen nicht auf.
- Über das „change-detection-Modul“ in ERDAS Imagine kann die flächenmäßige Zu- oder Abnahme einer Kategorie/Klasse festgestellt, verortet und quantifiziert werden.
- Darüber hinaus kann in einem weiteren Schritt (s.u.) zusätzlich zu Untersuchungen über Variationen innerhalb einer Kategorie/Klasse (s.o.) analysiert werden, ob ein Wechsel der Kategorie/Klasse stattgefunden hat. Die „neue“ Kategorie/Klasse kann benannt werden (s.o.; Details in Kap. 5.1.4).
- Die Veränderungsanalyse ist nicht mit den Unsicherheiten konventioneller Klassifikationen behaftet (z.B. Methode der maximalen Mutmaßlichkeit der Klassenzugehörigkeit). Dies ist zugegebenermaßen nicht direkt der Vergleichsanalyse, sondern vielmehr der wissensbasierten Klassifikation zuzuordnen. Allerdings bietet erst die modifizierte Anwendung

des Moduls „change detection“ in ERDAS Imagine den entscheidenden Vorteil, Einzelbildklassifikationen vergleichend zu analysieren (s.u.).

- Außerdem ist man durch die Erstellung unabhängiger Einzelbildklassifikationen nicht auf eine Kategorie-/Klassenbildung für die untersuchten Szenen festgelegt, sondern kann individuelle Klassifikationen für die einzelnen Datensätze durchführen (s.o. b): ein künstlich generierter Datensatz aller zu untersuchenden Szenen).
- Schließlich ist man durch den Vergleich unabhängiger Einzelbildklassifikationen nicht auf eine Harmonisierung der spektralen und radiometrischen Eigenschaften der Eingangsdatensätze angewiesen. Im Umkehrschluß besteht somit der hervorstechende Vorteil, daß Daten verschiedenster Sensoren vergleichend analysiert werden können, wenn die geometrische Auflösung ähnlich ist. Dies ist gerade für Monitoringaufgaben, die retrospektiv ausgerichtet sind, entscheidend. Im allgemeinen muß man hierbei auf vorhandenes Datenmaterial zurückgreifen, das zumeist nicht aufeinander und auf das Auftragsziel abgestimmt ist.

#### Angewandte fernerkundliche Monitoringtechniken

Kern der in dieser Arbeit verwendeten Methodik zur Veränderungsanalyse ist der Vergleich unabhängig durchgeführter Einzelbildklassifikationen. Hierzu werden die Einzelklassifikationen der beiden Luftbildmosaike sowie die verschiedenen Einzelbildklassifikationen auf Basis der Satellitenbildausschnitte untersucht.

Vordringliches Ziel der Analysen ist es, Veränderungen der Vegetation in bezug auf das Vorhandensein und die Ausbreitung der Pflanzen festzustellen. Hierbei konzentriert sich die Untersuchung beispielhaft auf die Kategorien/Klassen „Grünland“, „Grünland: kahler Untergrund bzw. versiegelt“, „Laubwald“, „Nadelwald“ sowie „Wald: kahler Untergrund bzw. versiegelte Flächen“. Außerdem wird für die TM-Szenen die Kategorie „Gewässer“ speziell für den Baggersee auf Veränderungen untersucht (Details: Kap. 5.1.4). Diese Flächen sind im Vergleich zu den anderen Landnutzungen/-bedeckungen für den Schutz, die Regeneration und den Erhalt der Natur und Umwelt sowie der Kulturlandschaften für den Raum besonders wichtig. Dies wird durch die Ausweisung der verschiedensten Landschafts- und Naturschutzgebiete für diese Flächen dokumentiert (vgl. Kap. 2.1). Aufgrund der verschiedenen Aufnahmedaten (25.07. zu 05.05., 01.05. zu 17.05. zu 02.07.) und der - zumindest für die Luftbildmosaike - sehr unterschiedlichen spektralen Eigenschaften der Daten sind jedoch weitere vergleichende Analysen der Vitalitätsgrade oder gar Artenzusammensetzung der Vegetation nicht möglich. Die Ergebnisse werden hierfür durch die phänologischen Entwicklungsstadien zu stark überlagert.

Ursprünglich ist das Modul für spektrale Veränderungsanalysen sowie für Untersuchungen von DGM-Daten o.ä. konzipiert worden. Der Algorithmus arbeitet laut Modulkonzeption zunächst mit nutzerdefinierten Schwellenwerten für die Veränderungsdiagnosen. Als Untersuchungseinheiten können Abweichungen in Prozent oder in absoluten Werten (z.B. Höhenangaben) gewählt werden. Zusätzlich zu dem Veränderungsbild als ein Ergebnisbild

(„highlight-change-file“), das die räumliche Verteilung der Subtraktion zweier Bilder oder zweier Kanäle sowie eine flächenmäßige Quantifizierung ermöglicht, wird ein Differenzbild als Resultat der Analyse erstellt („image-difference-file“). Dieses Bild zeigt detailliert pixelbezogen die Ausmaße der Veränderungen an, während das Veränderungsbild aufgrund der Schwellenwerte akzentuiert Zu- oder Abnahmen gemeinsamer Bildeigenschaften der Bilder dokumentiert (vgl. Abb. 4.13).

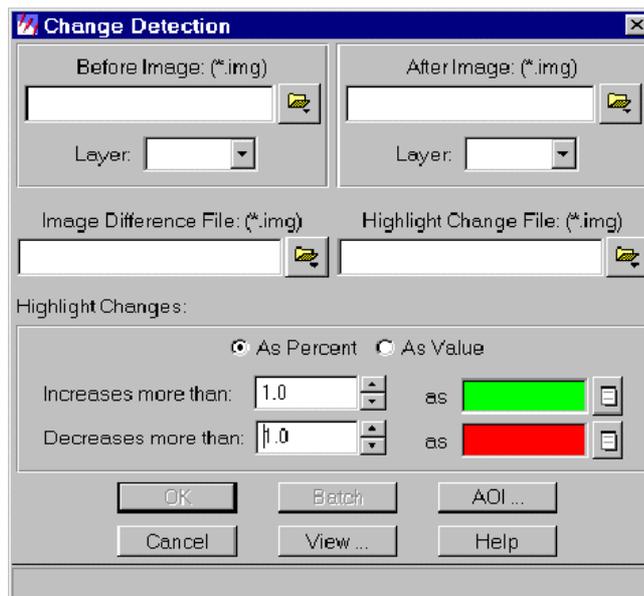


Abb. 4.13: Dialogfenster des Moduls „change detection“ in ERDAS Imagine 8.4 (screenshot)

Für die vorliegende Arbeit werden die Arbeitsschritte für die Nutzung des Moduls wie folgt modifiziert:

- Die Einzelklassifikationen der Luftbildmosaike bedürfen einer vorbereitenden Rekodierung der Klassen, um eine Veränderungsanalyse durchführen zu können, da die Klassifikationen individuell konzipiert sind. Dies ist für die Untersuchung der Satellitenbildszenen in der Form nicht erforderlich, da die Klasseneinteilungen der zu untersuchenden Klassen für alle Szenen einheitlich gestaltet werden konnten (s.u.).
- Für die Luftbildmosaike werden die Klassen bzw. die Klassennumerierungen mit Hilfe der Funktion „Raster > Recode“ aufeinander abgestimmt. Hierzu werden die Klassen „Grünland“, „Grünland: kahler Untergrund bzw. versiegelt“, „Laubwald“ und „Nadelwald“ der verschiedenen Vitalitätstufen sowie „Wald: kahler Untergrund bzw. versiegelte Flächen“ des CIR-Luftbildmosaiks in Anlehnung an die Klassennumerierungen des Color-Luftbildmosaiks rekodiert (vgl. Abb. 4.14, Tab. 4.3).
- Danach werden Bilder nur der einzelnen Klassen generiert, so daß die Analysen darauf konzentriert sind (alle nicht relevanten Klassen werden über die Rekodierung auf 0 gesetzt, so daß die weiteren Analysen zwischen „0“- und „1“-Klassen, je nach Klassennummern, unterscheiden). Die neuen Einzelklassifikationen werden als modifizierte „Vorher-“ und „Nachherbilder“ („before- and after-image“) in das Modul „change detection“ eingespeist. Hierbei ist es unerheblich, ob man die Veränderungen in Prozent-

oder in absoluten Werten darstellen möchte, da der eingespeiste Datentyp nicht die ursprünglichen Funktionen beansprucht (keine Schwellenwerte, Gradationen von Veränderungen, folglich ist das Differenzbild identisch mit dem Veränderungsbild). Die Einzelklassifikationen lassen in einem ersten Arbeitsschritt Aussagen über die Flächenausdehnung und räumliche Verteilung der Zu- oder Abnahme der Klasse zu.

- In einem weiteren Schritt kann aufgrund des Veränderungsbildes durch den Vergleich der untersuchten Klasse („Vorherbild“) mit den weiteren isolierten Klassen des „Nachher-Datensatzes“ festgestellt werden, ob mit der Zu- oder Abnahme Klassenwechsel der untersuchten wie auch der dazu benachbart liegenden Klassen verbunden sind (vgl. Kap. 5.1.4).

Für weiterführende Analysen können dann auch verschiedene Klassen/Kategorien in dem Modul vergleichend analysiert werden, um z.B. die Abnahme von Laubwaldflächen zugunsten der Ausdehnung von Ackerlandflächen zu untersuchen.

Die als verschattete Bereiche klassifizierten Flächen der untersuchten Klassen der Luftbildmosaike werden nicht weiter berücksichtigt, da hierüber keine Aussagen getroffen werden können (vgl. Kap. 5.1). Ähnlich verhält es sich für die Klassen „Übergang nicht vital zu vital“ und „Vegetation außer Wald“ der Satellitenbildklassifikationen, da diese Flächen durch phänologische Einflüsse einerseits zu stark überprägt sind und andererseits die Flächengrößen dieser Klassen gering sind (vgl. Kap 5.1).

Tab. 4.3: Rekodierung der Klassen des CIR-Luftbildmosaiks auf die Klassen des Color-Luftbildmosaiks

alte Klassen	neue Klassen
13 Grünland: kahler Untergrund bzw. versiegelt	11 Grünland: durchscheinender Boden bzw. versiegelt
15-21 Grünland in den Vitalitätsstufen 0,3 bis $\geq 0,9$	10 Grünland
43 Laubwald: kahler Untergrund, versiegelte Flächen	20 Laubwald: durchscheinender Boden, Holzanteil
45-51 Laubwald in den Vitalitätsstufen 0,3 bis $\geq 0,9$	18 Laubwald: grün reflektierend sowie 19 Laubwald ebenfalls rekodiert auf 18
40 Nadelwald: kahler Untergrund bzw. versiegelt	24 Nadelwald: durchscheinender Boden, Holzanteil
33-39 Nadelwald in den Vitalitätsstufen 0,3- $\geq 0,9$	22 Nadelwald: grün reflektierend sowie 23 Nadelwald ebenfalls rekodiert auf 22



Abb. 4.14: Dialogfenster zur Rekodierung der Klassen (screenshot)

Zwar sind die Klassifikationsansätze für die TM-Szenen identisch, jedoch müssen einzelne Unterklassen, die Vitalitätsstufen ausweisen, zusammengefaßt werden. Dieser Schritt ist notwendig, da für die einzelnen Szenen die phänologischen Entwicklungsstadien der Vegetation zu unterschiedlich sind. Vergleichende Analysen der Vitalitätsstufen werden demnach durch die Phänologie gänzlich verfälscht/überlagert. Tabelle 4.4 zeigt die Rekodierungen für die Klassen der Kategorien „Grünland“ und „Wald“. Bei der Rekodierung für die Kategorie „Gewässer“ der Landsat TM-Szenen hingegen werden alle nicht relevanten Klassen auf 0 gesetzt, so daß die Klasse „Gewässer“ (Klassennr. 1) isoliert untersucht werden kann.

Tab. 4.4: Rekodierung der Klassen der TM-Szenen für die Klassen der Kategorien „Grünland“ und „Wald“

alte Klassen	neue Klassen
34-38 Grünland in den Vitalitätsstufen 0,5 bis >=0,9	34 Grünland: vegetationsverdeckt
54-58 Laubwald in den Vitalitätsstufen 0,5 bis >=0,9	54 Laubwald: vegetationsverdeckt
59-63 Nadelwald in den Vitalitätsstufen 0,5->=0,9	59 Nadelwald: vegetationsverdeckt
51 Wald: kahler Boden bzw. versiegelt	51 Wald: kahler Boden bzw. versiegelt

Im Vorgriff auf die Ergebnisse, die in Kapitel 5.1 präsentiert werden, muß konstatiert werden, daß der Landsat MSS-Ausschnitt trotz der in der Literatur empfohlenen Pixelverkleinerung (vgl. Kap. 3.2) auf 10 m Kantenlänge aufgrund des „Resampling“-Verfahrens vergleichsweise hohe Informationsverluste aufweist. Dies wird durch einen Vergleich der zeitgleich aufgenommenen Landsat TM-Szene deutlich (vgl. Kap. 5.1). Aus diesem Grund wird dieser Ausschnitt für Veränderungsanalysen nicht weiter herangezogen. Zudem wirkt sich das „sixth-line banding“ verfälschend aus (vgl. Kap. 5.1.1).

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der hier beschriebenen Analysen vorgestellt. Begleitende Erläuterungen zu den Ergebnissen dienen der Einschätzung der Verlässlichkeit und der Aussagekraft der Resultate.

## 5 Ergebnisse

Aufgrund des Umfangs und der Komplexität der Ergebnisse werden sie in zwei Themenkomplexen zusammengefaßt und dargestellt:

1. Ergebnisse der Fallstudien (nur exemplarisch; vgl. Karten 5.1 bis 5.5) und
2. Ableitung des Praxisleitfadens.

### 5.1 Ergebnisse der Fallstudien

In Anlehnung an den Aufbau des vorangehenden Kapitels 4.2 „Analyse der Fernerkundungsdaten“ werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Fallstudien präsentiert:

1. Die Informationsquellen für den wissensbasierten Klassifikator werden vorgestellt:
  - die Vegetationsindexbilder und das RG-Indexbild inklusive Bewertung der Qualität und Aussagekraft der Ergebnisse,
  - die Landnutzungs- bzw. Landbedeckungsstrukturen aus digitalen DGK5- und ATKIS-Daten, die bezüglich ihrer thematischen Aktualität und geometrischen Genauigkeit charakterisiert werden.
2. Das Design der wissensbasierten Klassifikatoren für die einzelnen Fernerkundungsdatensätze wird dokumentiert.
3. Die Teilklassifikationen sowie die Gesamtklassifikationen der Luftbildmosaike (1985, 1990) und der Satellitenbilddausschnitte (1986, 1991) werden dargestellt.
4. Die Ergebnisse der Veränderungsanalysen für ausgewählte Landbedeckungs-/Landnutzungsstrukturen werden präsentiert.

#### 5.1.1 Informationsquellen für den wissensbasierten Klassifikator

Im folgenden werden die Indexbilder sowie die Bildsegmentierungen aus digitalen DGK5- und ATKIS-Daten, die Eingangsinformationen für die wissensbasierten Klassifikationen bilden, als Teilergebnisse vorgestellt.

##### 5.1.1.1 Vegetationsindexbilder und RG-Indexbild

Zunächst werden die Indexbilder für das CIR-Luftbildmosaik dokumentiert. Die Ergebnisse des SAVI- und des TSAVI-Bildes werden nochmals kurz diskutiert (vgl. Diskussion in Kap. 4.2). Im Anschluß daran wird das RG-Indexbild für das Color-Luftbildmosaik charakterisiert. Die Indexbilder der Satellitenbilddausschnitte weisen einige Gemeinsamkeiten auf, die der chronologischen Dokumentation der Indexbilder je Aufnahmedatum vorangestellt sind. Danach werden für die TM-Szenen von 1986 die NDVI- und MNDVI-Bilder vorgestellt, bevor für die TM-Szene von 1991 zusätzlich auch das SAVI- und das TSAVI-Bild gemäß der

Diskussion aus Kapitel 4.2 erläutert werden. Die Ergebnispräsentation der Indexbilder schließt mit der Charakterisierung der NDVI-Bilder für den MSS-Ausschnitt ab.

#### (1) CIR-Luftbildmosaik

Die drei Indexbilder (NDVI, SAVI, TSAVI) geben für den Untersuchungsraum in den vordefinierten Klassenabständen die Vitalitätsgrade wieder (vgl. Kap. 4.2). Dabei ist jeweils das gesamte Mosaik ohne Bildsegmentierung auf Basis der DGK5-Daten bearbeitet worden. Demzufolge werden die Vitalitätsgrade unterschiedslos pixelorientiert wiedergegeben. Auch versiegelte Flächen oder Wasserflächen können je nach Reflexionseigenschaften aufgrund der spezifischen Oberflächencharakteristiken NIR-Reflexion zeigen, obwohl dies idealerweise nicht auftreten sollte (s.u.: Indizes der Satellitenbilder). Insgesamt können folgende Ergebnisse festgehalten werden:

1. SAVI und TSAVI zeigen sich in den Klassen von  $<0$  bis maximal  $<0,10$  unempfindlicher als der NDVI. Folglich sind die räumlichen Differenzierungen von Vegetation mit geringen Vitalitätsgraden sowie anderer Objekte, die in diesen Wertebereichen liegen, hierüber schlechter nachzuvollziehen als mit dem NDVI (dies wird auch durch LYON et al. 1998 bestätigt; Abb. 5.1).

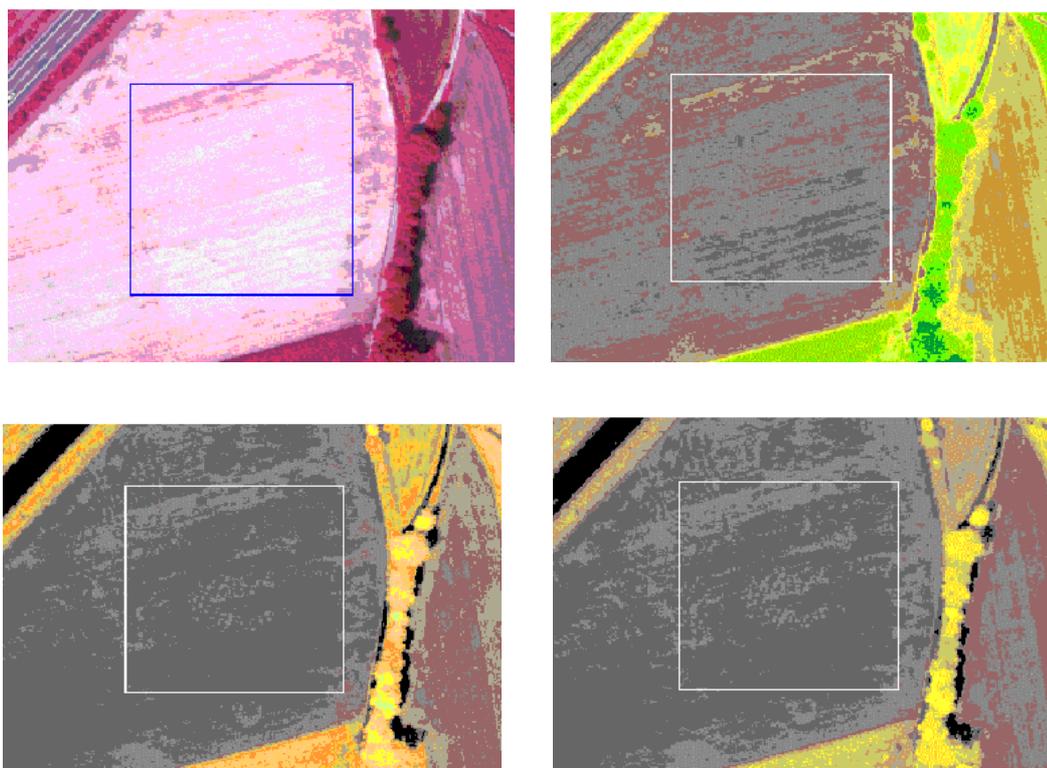


Abb. 5.1: Vergleichende Gegenüberstellung der Empfindlichkeit und Detailauflösung der Farben der Indizes NDVI, SAVI und TSAVI (oben rechts, unten links, unten rechts). Nicht vitale Flächen werden im NDVI-Bild in dunkelgrau bis grau dargestellt. Gering vitale Bereiche werden in den Farben dunkelbraun, hellbraun und ocker abgebildet (vgl. Suchbox in der weitestgehend unbestellten Ackerfläche: CIR-Luftbildmosaik oben links). In den beiden anderen Indexbildern werden hierzu lediglich zwei NDVI-Stufen unterschieden (screenshots).

Dies erstreckt sich auch auf Schattenbereiche, die z.B. durch begleitende Baumreihen an Nutzungsgrenzen entstehen. Hier zeigt sich, daß der NDVI differenziertere Informationen liefert als die anderen beiden Indizes. Die detaillierte Darstellung der Vitalitätsgrade behält der NDVI auch für höhere Klassen (vitalere Bereiche) bei, so daß gegenüber den beiden anderen Indizes kein Informationsverlust eintritt.

2. Wie bereits im Kapitel der Datenvorprozessierung angesprochen, beeinflusst der Randabfall in den mosaikierten Bildern die Ergebnisse der Indizes. So wird deutlich, daß vor allem in der südöstlichen und nordöstlichen Ecke des Mosaiks relativ hohe Vitalitätsgrade angezeigt werden, die sich durch die Randabfälle in den Ursprungsbildern ergeben. Durch die Verschattungen der Randbereiche wurden die Spektraleigenschaften der Bildränder so stark verändert, daß in der Ratiobildung die Vitalität überschätzt wird. Dies läßt sich tendenziell für den gesamten Südrand des Mosaiks feststellen, zumal dies durch sehr hell reflektierende Bildmittenbereiche, die im Zentrum des Mosaiks zusammengefügt wurden, verstärkt wird. Hier wird die Vitalität unterschätzt (vgl. Abb. 5.2).

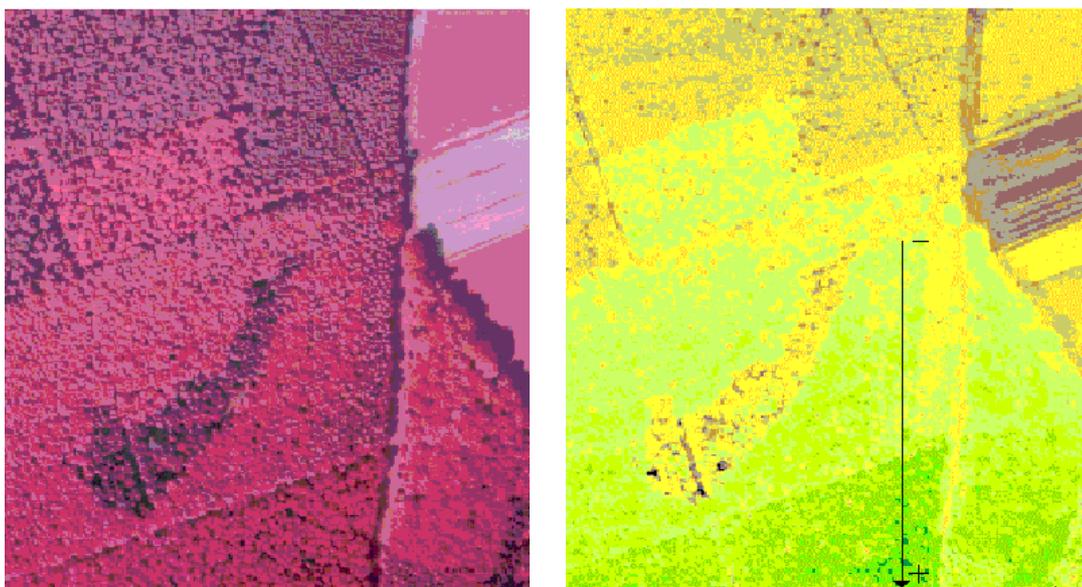


Abb. 5.2: Beispiel für den Einfluß der Spektraleigenschaften der Originalluftbilder (Randabfall) auf den NDVI: tendenziell nach unten zunehmende „Vitalität“ v.a. der Laubwaldflächen, gekennzeichnet durch den +/- Pfeil sowie die kräftigeren Grüntöne im unteren Bildbereich trotz gleichbleibender Objekteigenschaften (NDVI-Bild rechts, screenshots).

3. Aufgrund der Bestandsdichte und des Einfallswinkels der Sonne in Relation zur Aufnahmeorientierung der Luftbilder kommt es in den Waldflächen zu Schattenwurf der Bäume und folglich zu verschatteten Bereichen.

Dieser Aspekt wie auch der vorgenannte Punkt sind jedoch im Rahmen der wissenschaftlichen Klassifizierungen kaum hinderlich. Die Variationen der NDVI-Werte wie auch der Grauwerte des Mosaiks sind so gering, daß sie auf die Festlegung der Variablen, insbesondere die

Schwellenwerte für den wissensbasierten Klassifikator kaum negativen Einfluß haben (die NDVI-Werte schwanken hier in einer Intervallgröße von ca. 0,1). Das SAVI- und das TSAVI-Bild werden im weiteren Verlauf der Arbeiten nicht weiter berücksichtigt (vgl. Kap. 4.2: Untersuchungen zu Korrelationen der Indizes).

## (2) Color-Luftbildmosaik

Das RG-Indexbild gibt Aufschluß über den Anteil der Grünreflexion an der Gesamtreflexion eines Pixels (Details vgl. Kap. 4.2). Zwar kann hierüber die räumliche Verteilung grüner Vegetation festgestellt werden, jedoch sind weiterführende Untersuchungen, wie sie mit dem NDVI durchgeführt werden können, nicht möglich. Auch für dieses Mosaik wird der Index flächendeckend berechnet.

Die Variationen in den Reflexionen, die im CIR-Luftbildmosaik durch die Randabfallproblematik gehäuft auftreten, sind für dieses Luftbildmosaik geringer. Sie treten mit schwach steigender Tendenz der „Grünheit“ der Vegetation nach Süden hin in einem schmalen Streifen am südlichen Bildrand nur an wenigen Stellen auf (vgl. Abb. 5.3).



Abb. 5.3: Vergleich der Reflexion von Laubwaldflächen: Lage in der oberen Bildhälfte (Suchbox) sowie Lage am unteren Bildrand (Fadenkreuz). Im klassifizierten Bild rechts wird die Laubwaldfläche im Bereich der Suchbox trotz gleichbleibender Objekteigenschaften im Vergleich zu der Waldfläche am unteren Bildrand als weniger „grün/vital“ eingestuft (hellere Grüntöne im Vergleich zu dunkleren, kräftigeren Grüntönen). Dieses Phänomen wird durch den Randabfall in den Originalbildern hervorgerufen (screenshots).

Variationen in den Reflexionen werden auch in diesem Mosaik durch die Bestandsdichten in den Wäldern hervorgerufen. Der Schattenwurf führt auch hier zu einer typischen Textur von Schatten- und Lichtbereichen in den Waldflächen. Dieses Phänomen wird im Rahmen der wissensbasierten Klassifikation berücksichtigt (vgl. Kap. 5.1.2, 5.1.3).

Insgesamt zeigen die Indexbilder die für die Jahreszeit zu erwartenden Vitalitäts- bzw. „Grünheitsgrade“ an. Die Ackerflächen sind dabei selbstverständlich anthropogen über-

prägt, so daß keine Aussagen über typische Entwicklungsstadien getroffen werden können, ohne daß Informationen über die Kulturpflanzen pro Feld zur Verfügung stünden. Die Grünlandflächen zeigen über weite Flächen die zu erwartenden Reflexionen entsprechend ihrer Phänologie.

Die Laubwaldflächen hingegen zeigen für 1990 sehr deutlich, daß entsprechend der Phänologie der Waldboden wie auch der Baumholzanteil das Reflexionsverhalten der Laubwaldflächen dominieren (vgl. Abb. 5.4).

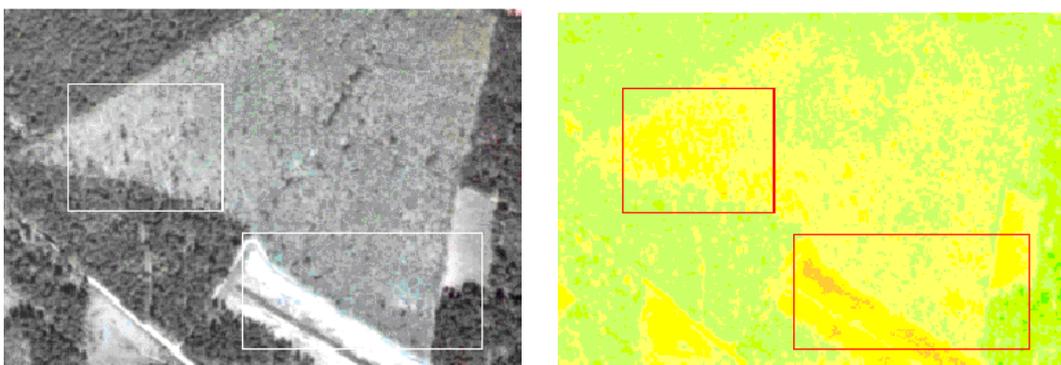


Abb. 5.4: Boden- und Holzreflexion für die Laubwaldfläche entsprechend der phänologischen Entwicklung des Laubwaldes am 05.05.1990, erkennbar durch die Schattierungen in Grün, Ocker, Gelb und Orange in der Laubwaldfläche im Bildzentrum, klassifiziertes Bild rechts (vgl. Suchboxen zur besseren Orientierung). Dabei repräsentiert der Farbverlauf von Grün nach Orange abnehmende Grünreflexion (screenshots).

Eine Quantifizierung der Flächenanteile der verschiedenen Vitalitätsgrade bzw. der Anteile grün reflektierender Vegetation wird im Rahmen der wissensbasierten Klassifikationen vorgenommen (vgl. Kap. 5.1.3).

### (3) Indexbilder der Satellitenbildausschnitte

Im folgenden werden die Indizes für die einzelnen Satellitenbildszenen in chronologischer Folge vorgestellt. Dabei werden für alle Zeitpunkte die NDVI-Bilder (MNDVI-Bilder aufgrund der Sensoreigenschaften nur für die TM-Szenen) der Datensätze, die auf absolute Reflexionswerte atmosphärenkorrigiert wurden, vorgestellt. Parallel dazu werden auch die auf DN-Werte korrigierten Datensätze aufgeführt. Für eine umfassende Dokumentation der Diskussion über die Nutzung auch von SAVI und TSAVI (vgl. Kap. 4.2) werden diese Indexbilder für den Landsat TM-Ausschnitt von 1991 kurz charakterisiert. Die Bilder besitzen dabei die ursprüngliche Ausdehnung des Untersuchungsraums (vgl. Kap. 2.1) und sind noch nicht auf die Fläche des ATKIS-Datensatzes, die der wissensbasierten Klassifikation der Satellitenbildszenen zugrunde liegt, zugeschnitten. Auch hier wird - wie schon für die Luftbildmosaike - jeweils ein flächendeckendes Indexbild erstellt.

Allen Satellitendatensätzen gemeinsam sind folgende Aspekte:

- Obwohl die Datensätze atmosphärenkorrigiert sind, ist eine Einstufung von Teilen der Gewässer und der versiegelten Flächen in Klassen mit NDVI-Werten  $\geq 0$  für alle Bilder gegeben. Dies entspricht nicht der ideal anzunehmenden Null-Reflexion von Wasser im NIR, die negative NDVI-Werte für die Gewässer hervorrufen würde. Gründe für die Abweichungen können z.B. im Schwebstoffanteil des Wassers oder auch in der Oberflächenrauigkeit der Gewässer liegen.
- Für weite Strecken des Lippeverlaufs, für große Strecken des Wesel-Datteln-Kanals wie auch für Autobahnverläufe werden ebenfalls von den Erwartungen abweichende Reflexions- und folglich Ratiowerte angezeigt. Das ist zum einen auf die linienhafte Struktur der Wasserläufe und der Autobahnen zurückzuführen, die im Zuge der Geocodierung für die Glättung und folglich Veränderung der Grauwerte sehr empfindlich sind (s.o. Kap. 3.2: Verfahren der bilinearen Interpolation). Die relativ frühen phänologischen Stadien der Aufnahmen vom 01.05. und 17.05.1986 führen zu einer geringeren Reflexion der Vegetation im NIR. Folglich liegt die gemischte Spektralinformation benachbarter Pixel (Wasser-Vegetation) im Grauwertspektrum relativ nah beieinander, so daß im Zuge des „Resamplings“ die Reflexionen rasch geglättet und harmonisiert werden. Zum anderen kann dies durch die chemische Zusammensetzung wie auch den Schwebstoffanteil gerade in dem durch Schifffahrt bewegten Kanalwasser hervorgerufen werden. Nicht zu vernachlässigen ist auch für diese Gewässer und die Autobahnen die mögliche (wind- bzw. asphaltbedingte) Rauigkeit der Oberflächen, die stellenweise zu veränderten Reflexionseigenschaften führt.
- Die Indexbilder der einzelnen Zeitpunkte sind individuell zu behandeln. Das bedeutet, daß z.B. für das Datum 01.05.1986 die höchsten NDVI-Klassenwerte bei über 0,95 liegen, während sie z.B. für die Landsat TM-Szene vom 02.07.1991 bis maximal  $\approx 0,95$  reichen. Dieser Umstand ist trotz der Atmosphärenkorrektur der Daten auf die verschiedenen Aufnahmebedingungen zurückzuführen. Hinzu kommen sensorbedingte Schwankungen in der Kalibration, die zum heutigen Zeitpunkt nicht mehr rekonstruierbar sind. Daher sollten pixelorientierte quantitative Vergleiche der Klassenwerte nur vereinzelt vorgenommen werden, während relative Vergleiche der Flächen ohne Probleme durchgeführt werden können.

Die Informationen der auf absoluten Reflexionswerten basierenden NDVI-Bilder werden im Rahmen der wissensbasierten Klassifikation weiterverarbeitet und in der Fläche quantifiziert (vgl. Kap. 5.1.2, 5.1.3).

#### (4) Landsat TM-Szene vom 01.05.1986: NDVI auf Basis der absoluten Reflexionswerte und der DN-Werte, MNDVI auf Basis der DN-Werte

Beide NDVI-Bilder zeigen bezüglich der Vitalitätseinstufungen gleiche Trends auf, die sich selbstverständlich auch in der flächenhaften Verteilung widerspiegeln. Während das auf Prozentwerten basierende Bild die Extrembereiche wie „nicht vital“ und „hoch vital“ für

viele Bereiche sehr deutlich hervorhebt, erfahren diese Bereiche in dem auf DN-Werten basierenden Bild in dem Wertebereich von 0-255 einen Ausgleich/Streckung. Folglich stehen entsprechend weniger Pixel für die Darstellung der Extrembereiche zur Verfügung (vgl. Abb. 5.5).

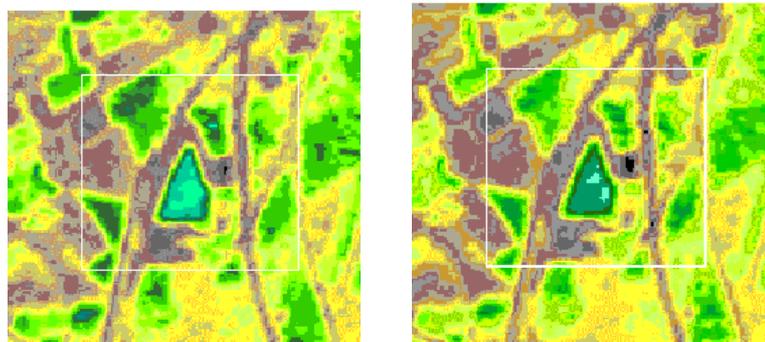


Abb. 5.5: Beispiel eines Extrembereichs: Vergleich sehr vitaler Flächen, dargestellt über kräftig-dunkle Grün- und Türkistöne in den NDVI-Bildern; die Suchbox dient der besseren Orientierung (links Prozentwerte, rechts DN-Werte zugrundeliegend; screenshots).

Aufgrund der Jahreszeit befinden sich die Laubwälder im allgemeinen noch in einer frühen phänologischen Phase, während das Reflexionsverhalten der Nadelwaldflächen dagegen von späteren phänologischen Stadien nicht so stark abweicht. Die Grünlandflächen zeigen ein stabiles Reflexionsverhalten; zum Teil sind sie jedoch anthropogen beeinflusst (z.B. Mahd, Ackerbau; s.u.). Die Ackerflächen sind durch Fruchtfolgegewechsel bestimmt und lassen - ähnlich wie für die Luftbildmosaik - keine Aussagen über typische phänologische Entwicklungsphasen zu (s.o.). Das stark reduzierte Reflexionsverhalten der meisten Laubwaldflächen im NIR muß im Zuge der Klassifikation berücksichtigt werden und führt zu Modifikationen des Klassifikators für die Szene vom 01.05.1986 (vgl. Kap. 5.1.2).

Die Verteilung der Klassenwerte aufgrund des MNDVI für diesen Zeitpunkt korrespondiert erwartungsgemäß weitestgehend mit den Ergebnissen der NDVI-Bilder. Laubwald- und Ackerflächen werden meist als „wenig bis nicht vital und feucht“ definiert (MNDVI-Werte  $\geq 0$ ). Sie werden zusammen mit versiegelten Bereichen oder Abgrabungsflächen in einer Klasse ausgewiesen (Sand- und Kiesabbau östlich des Halterner Stausees). Die Lippeauenbereiche, die zumeist der Grünlandnutzung dienen, weisen hingegen recht hohe Vitalitäts- und Feuchtegrade auf (respektive geringe Ratiowerte).

#### (5) Landsat TM-Szene vom 17.05.1986: NDVI auf Basis der absoluten Reflexionswerte und der DN-Werte, MNDVI auf Basis der DN-Werte

Auch hier weisen beide NDVI-Bilder gleiche Trends und räumliche Verteilungen von Vitalitätsgraden auf. Allerdings sind die Belegungen der Klassenwerte - eventuell bedingt durch die stark abweichenden Atmosphärenbedingungen während der Aufzeichnung im Vergleich

zum 01.05.1986 und 02.07.1991 - weitestgehend gleich; Abweichungen in der Darstellung von Extremwerten treten nicht mehr wie in dem vorherigen Datensatz auf.

Auch in dem MNDVI-Bild sind schon rein visuell versiegelte Bereiche wie die CWH oder Wohnbauflächen (z.B. Haltern) von vegetationsbestandenen Bereichen unterscheidbar. Kahler Untergrund ist häufig auch von versiegelten Flächen trennbar (nicht bestellte Ackerflächen, Abgrabungsflächen etc., vgl. Abb. 5.6).

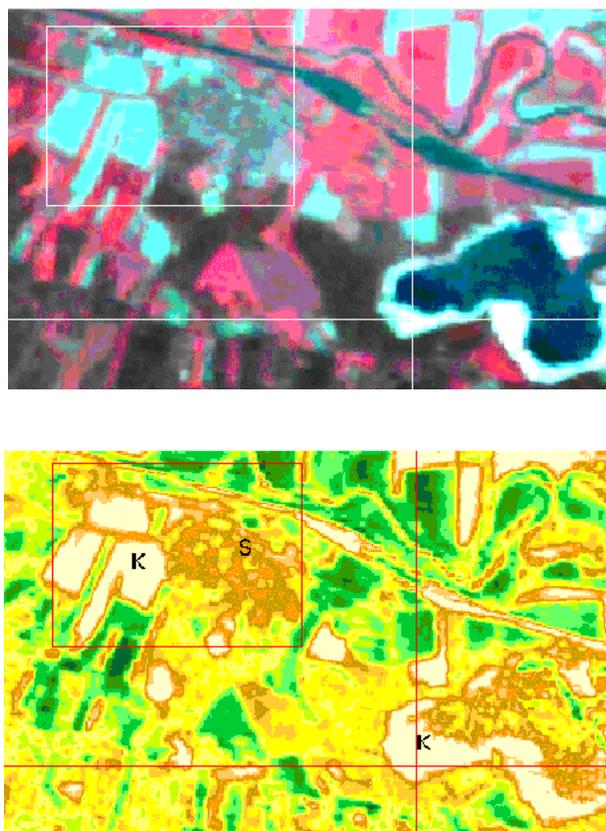


Abb. 5.6: Visuelle Unterscheidbarkeit von kahlem Untergrund (hellgelb, symbolisiert durch den Buchstaben „K“) und versiegelten Flächen (meist Orangetöne, symbolisiert durch den Buchstaben „S“) im Satellitenbildausschnitt (Kanäle 4, 3, 2, oben) und im MNDVI-Bild vom 17.05.1986 (unten; screenshots).

Allerdings werden Wasserflächen abweichend von den Erwartungen klassifiziert. Aufgrund des Algorithmus des MNDVI zeigen Wasserflächen sowie sehr feuchte Pflanzen normalerweise sehr niedrige Ratiowerte an (vgl. Kap. 4.2). Ein möglicher Grund für relative hohe Reflexionswerte der Wasserflächen im MIR könnte darin liegen, daß die Szene stark mit hochnebelartiger Schleierbewölkung belastet ist, die im Zuge der Atmosphärenkorrektur zwar reduziert, aber nicht beseitigt werden konnte. Dies kann zu stark verändertem Reflexionsverhalten führen (vgl. Abb. 5.6 oben: Zusammenfassung Teile der Wasserfläche im südlichen Bereich mit Sandflächen im Uferbereich in einer Klasse).

(6) Landsat TM-Szene vom 02.07.1991: NDVI, SAVI und TSAVI auf Basis der absoluten Reflexionswerte und der DN-Werte, MNDVI auf Basis der DN-Werte

Für diese Szene werden - wie für die Szene vom 01.05.1986 bei gleichen Trends beider NDVI-Bilder - wieder Unterschiede in der Akzentuierung von Extrembereichen sichtbar (vgl. Abb. 5.7).

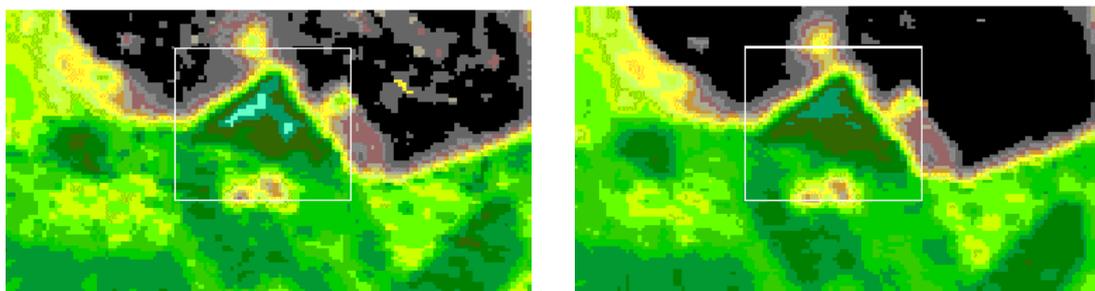


Abb. 5.7: NDVI-Bilder - Beispiel eines Extrembereichs: Vergleich sehr vitaler Flächen, dargestellt über kräftig-dunkle Grün- und Türkistöne, die Suchbox dient zur besseren Orientierung (links Prozentwerte, rechts DN-Werte zugrundeliegend; screenshots).

Aufgrund der weiter fortgeschrittenen Entwicklung der Vegetation sind versiegelte Bereiche, Gewässer sowie der Kanal deutlich von der Vegetation zu unterscheiden. Das gilt auch für das MNDVI-Bild, in dem Wasserflächen (Seen), versiegelte Bereiche und Vegetation als drei große Gruppen schon im ersten Überblick voneinander zu trennen sind. Bereiche mit sehr feuchter Vegetation bzw. Vegetation in vernässten Zonen sind als vierte Gruppe isolierbar. Die wenigen kahlen, offen gelassenen Flächen (Äcker, Abgrabungsflächen) sind auch hier gut von versiegelten Flächen trennbar.

Abschließend seien noch das SAVI- und das TSAVI-Indexbild erwähnt. Beide weichen wie erwartet nur geringfügig vom NDVI-Bild ab und bestätigen die hohen Korrelationen der Indizes, die in Kapitel 4.2 berechnet wurden.

(7) Landsat MSS-Szene vom 02.07.1991: NDVI auf Basis der absoluten Reflexionswerte und der DN-Werte

Auch in diesen Indexbildern sind Bereiche mit vitaler Vegetation gut von versiegelten Arealen und Wasserflächen zu trennen. Einem Vergleich mit den Bildern des Sensors Landsat TM vom gleichen Datum halten sowohl das auf 10 m Pixelkantenlänge geocodierte Multispektralbild wie auch die Indexbilder des Sensors MSS jedoch nicht stand. Für Pixel mit einer Bodenauflösung von 56 m x 79 m führt der Vervielfachungsfaktor im Rahmen der Optimierung der Detailerkennbarkeit dazu, daß im Zuge des parallel laufenden „Resampling“-Verfahrens die glättende Wirkung der Grauwerttransformation zu sehr hohen Informationsverlusten führt (siehe auch ORTHABER 1999, S. 47), zumal die Bodenauflösung der Ausgangspixel sensorbedingt nur sehr gemittelte Reflexionsinformation aufweist (Stichwort Mischpixelproblematik).

Zugleich wird bei der Erstellung der NDVI-Bilder deutlich, daß schon die Rohdaten mit dem als systematisch bekannten Fehler des „sixth-line banding“ behaftet sind (s. auch MATHER 1993, S. 55 ff.). Der Landsat-MSS-Sensor zeichnet pro Spiegelbewegung immer in sechs Scanlinien zugleich auf. Im Laufe der Jahre werden die Detektoren in ihrer Kalibration instabil. Diese Instabilitäten führen dazu, daß Objektreflexionen von den einzelnen Sensoren innerhalb eines Spektralkanals als unterschiedlich hoch registriert werden. Dies geschieht systembedingt durch die Wiederholungsraten stets im Abstand von sechs Scanlinien und ist als das Phänomen des „sixth-line banding“ bekannt geworden. Gestützt wird die Vermutung durch Abstandsmessungen der Streifenbildung in den NDVI-Bildern des MSS-Sensors. Die Messungen können wegen der Struktur der Streifen zwar nur ungefähre Abstandsmaße wiedergeben, doch die Entfernungen zwischen den streifigen Strukturen bewegen sich immer um ca. 480 m. Das entspricht bei einer Pixelkantenlänge von 79 m für diese Rechteckseiten (Nord-Süd) der Pixel einer Strecke von sechs Pixeln (vgl. Abb. 5.8). Dieser Fehler wird im Zuge der Datenvorprozessierungen multipliziert und tritt in den NDVI-Bildern deutlich hervor (in dem auf Reflexionswerte korrigierten mehr als in dem auf DN-Werte korrigierten Bild). Der Effekt ist gerade für den grünen und den roten Kanal, MSS1 und MSS2 (NDVI-Algorithmus) entscheidend und deutlich sichtbar. Durch die Atmosphärenkorrektur wird die Streifenstruktur weiter verstärkt (Kontrastverstärkung). Diese Verfälschungen sind für weitere Analysen nicht akzeptabel, so daß die MSS-Szene im weiteren Verlauf zwar noch klassifiziert, aber nicht mehr einer Veränderungsanalyse unterzogen wird.

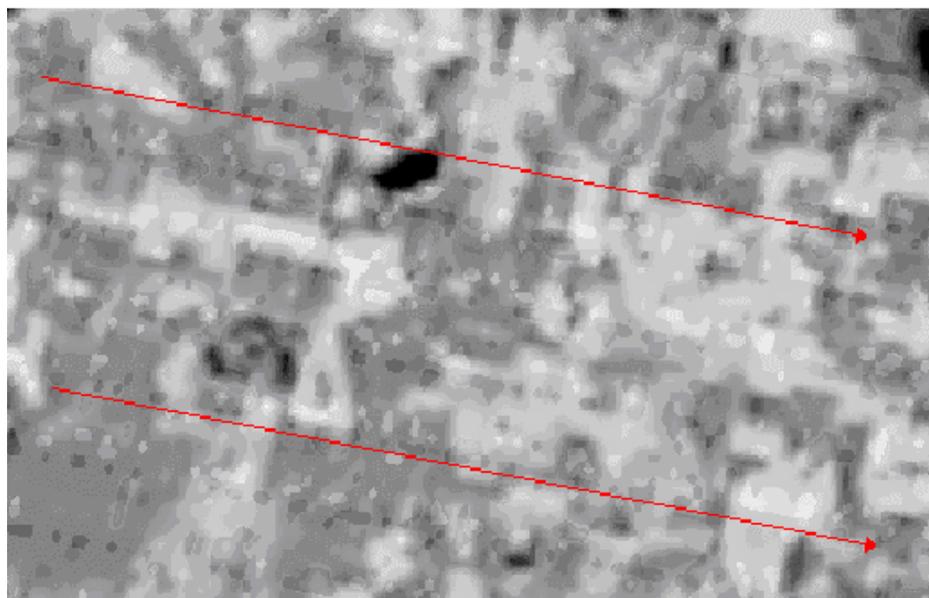


Abb. 5.8: Streifenstruktur im NDVI-Bild der MSS-Aufnahme vom 02.07.1991. Die roten Pfeile veranschaulichen die Lage der in regelmäßigen Abständen auftretenden Streifen (auf Prozentwerte atmosphärenkorrigiert, Pixelkantenlänge: 10 m). Vermutete Ursache: Phänomen des „sixth-line banding“ (screenshot).

### 5.1.1.2 Bildsegmentierung auf Basis der digitalen DGK5- und der ATKIS-Daten: Paßgenauigkeit und Aktualität der Daten

In diesem Kapitel werden die Paßgenauigkeit und Aktualität der Bildmasken, die aus digitalen DGK5- und ATKIS-Daten erstellt werden, im Vergleich zu den Luftbildmosaikern und Satellitenbilddausschnitten geprüft. Dabei treten zeitliche und räumliche Ungenauigkeiten/Abweichungen zwischen den Segmentierungen und den Fernerkundungsdaten fast zwangsläufig auf (s.u.). Die folgenden Erläuterungen verdeutlichen zudem, daß die Bildung von Unterklassen je gewählter Klasse/Kategorie notwendig ist, um die gesamte Bandbreite der möglichen Landbedeckungen zu erfassen. Ein Grund dafür ist, daß Fernerkundungsdaten aktuelle und unverfälschte bzw. nicht generalisierte Informationen wiedergeben, während Kartenwerke häufig generalisierte Landnutzungs- bzw. Landbedeckungsstrukturen aufzeigen. So ist z.B. eine Baustelle mit großen Kahlflächen und Bauschutt im Zuge eines Verkehrswegeausbaus über Fernerkundungsdaten ansprechbar; digitale DGK5- und ATKIS-Daten weisen diese Fläche entsprechend des letzten Fortschreibungsdatums als Grünland oder Forst aus und geben keine Hinweise auf aktuelle oder vorübergehende Veränderungen.

#### (1) Digitale DGK5-Daten: Paßgenauigkeit

Die manuell aus digitalen DGK5-Karten (1987-1997) abdigitalisierten Landnutzungs-/Landbedeckungsklassen „Ackerflächen“, „Grünland“, „Flächen mit gemischter Nutzung“, „Wasserflächen“, „Waldflächen“ getrennt nach laub- und nadelwalddominierten Flächen weisen insgesamt eine gute geometrische Paßgenauigkeit mit den Luftbildmosaikern von 1985 und 1990 auf. Nur die Maske für Wasserflächen weicht - wie weiter unten erläutert wird - im Verlauf der Lippe und des Wesel-Datteln-Kanals zum Teil ab (vgl. Abb. 5.9).

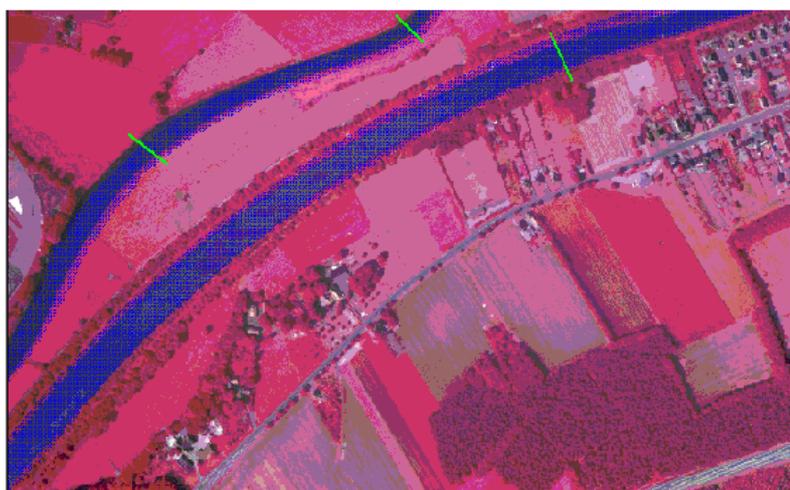


Abb. 5.9: CIR-Luftbildmosaik mit aufliegender Maske (blau) für Wasserflächen: Paßungenauigkeiten aufgrund der Mosaikierung werden beispielhaft durch hellgrüne Linien gekennzeichnet (screenshot).

Die Luftbildmosaike, die zunächst unabhängig voneinander erstellt und sukzessive im Rahmen der Mosaikierung geocodiert wurden, weisen eine relativ gute Paßgenauigkeit der Wasserwege untereinander auf. Schwerwiegende Fehler im Zuge der Geocodierung scheinen somit ausgeschlossen. Sehr wahrscheinlich sind die Abweichungen zwischen Karte und Luftbildmosaik jedoch durch das Mosaikieren und das damit verbundene zum Teil mehrfache Nachkorrigieren der Geocodierung der einzelnen Luftbilder untereinander hervorgerufen worden.

## (2) Digitale DGK5-Daten: Aktualität

Die einzelnen DGK5-Blätter weisen sehr unterschiedliche Herstellungs- bzw. Fortschreibungsdaten auf (1987-1997), die zu starken Abweichungen für einige der Landnutzungsklassen für 1985 und 1990 führen können. Dies dürfte insbesondere für die Klassen „Mischnutzung“ und „Ackerflächen“ gelten, während die Veränderungszyklen für Wasser-, Wald- und Grünlandflächen im allgemeinen sehr viel länger dauern (eine Ausnahme wird in Abb. 5.10 für die Klasse „Grünland“ dokumentiert). Allerdings zeigen auch die Ergebnisse der Veränderungsanalysen der Waldflächen deutliche Veränderungen infolge von Rodungen oder Aufforstungsflächen für den Beobachtungszeitraum von fünf Jahren auf.

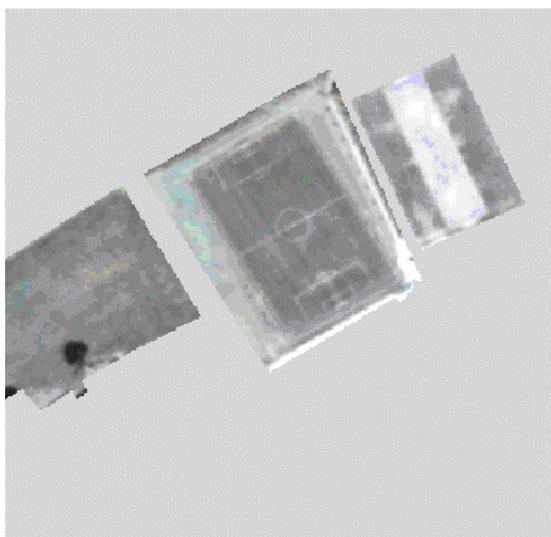


Abb. 5.10: Laut DGK5 als Grünland ausgewiesene Flächen (Maske Grünland: grau), die im Color-Luftbildmosaik von 1990 zu einem Fußball- und einem Bolzplatz umgenutzt waren (Bildmitte bzw. Bild rechts; screenshot).

Wie einleitend bereits erwähnt wurde, zeigt Abbildung 5.10, daß die DGK5-Daten für einige Flächen eine andere Nutzung ausweisen, als das Luftbild dokumentiert. Dies ist auf die zeitlich stark abweichenden Aufnahme- bzw. Erhebungszeitpunkte zurückzuführen. Daher werden pro Klasse/Kategorie weitere Unterklassen ausgewiesen, um die Variationen innerhalb der Kategorien genauer erfassen zu können (vgl. Klassifikationsdesign Kap. 5.1.2).

### (3) ATKIS-Daten: Paßgenauigkeit

Ähnlich wie für die Luftbildmosaike ist die Paßgenauigkeit der einzelnen isolierten Masken auf Basis der ATKIS-Daten insgesamt durchaus zufriedenstellend; nur die Maske für die Wasserflächen zeigt stellenweise Abweichungen. Diese Ungenauigkeiten sind teilweise durch die Geocodierungen bedingt. Zum Teil zeigen sie jedoch wasserstands- oder erosionsbedingte Veränderungen der Uferlinien des südlich an den Wesel-Datteln-Kanal angrenzenden Baggersees an (vgl. Abb. 5.11).

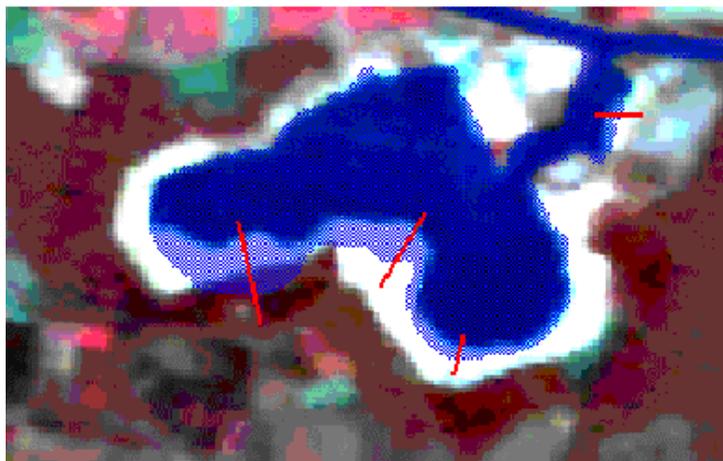


Abb. 5.11: Vergleich der Paßungenauigkeit der Wassermaske (blau) aus ATKIS-Daten (1999) mit der Ausdehnung einer Wasserfläche am 01.05.1986. Durch rote Linien sind einige Stellen beispielhaft hervorgehoben (screenshot).

Beispielhafte Vergleiche zwischen den Luftbildmosaikern und den ATKIS-Daten haben zudem gezeigt, daß die maßstabsunabhängigen Daten (DLM-25-Daten) für diese großen Maßstäbe durch den Generalisierungsgrad der Daten keine zufriedenstellende Paßgenauigkeit mehr aufweisen, so daß eine ursprünglich angedachte Nutzung der ATKIS-Daten für eine Bildsegmentierung der Luftbilddaten nicht empfehlenswert erscheint.

### (4) ATKIS-Daten: Aktualität

Auch für diese Daten ergeben sich die oben genannten Probleme der zeitlichen „Paßgenauigkeit“ der Herstellungsdaten der ATKIS-Daten im Vergleich zu den Satellitenbildausschnitten (2000 zu 1986 bzw. 1991). Aus diesem Grund werden die Klassifikationen entsprechend modifiziert, um die einzelnen kategorieinternen Phänomene besser erfassen zu können (Details dazu unter Kap. 5.1.2).

### 5.1.2 Design der wissensbasierten Klassifikatoren

Im folgenden werden der Aufbau und die Struktur der wissensbasierten Klassifikationsansätze für die Fernerkundungsdatensätze als weitere Teilergebnisse der vorliegenden Arbeit dokumentiert. Die Struktur der wissensbasierten Klassifikatoren wird dabei über das Modul „knowledge engineer“ unter ERDAS Imagine festgelegt (vgl. auch Kap. 4.2 und Abb. 4.8). Das heißt, daß die erwartete Hypothese/Ausgabeklasse über ein hierarchisches System aus Regeln, die die Verknüpfungen der Eingangsvariablen organisieren, definiert wird (vgl. Abb. 5.12). Auf unterster Ebene bestimmen die Konditionen für die Eingangsvariablen die Charakteristiken der Ausgabeklassen. Die Variablen werden dann über die nächsten Organisationsschritte/Regeln realisiert, um schließlich die jeweilige Ausgabeklasse zu verifizieren.

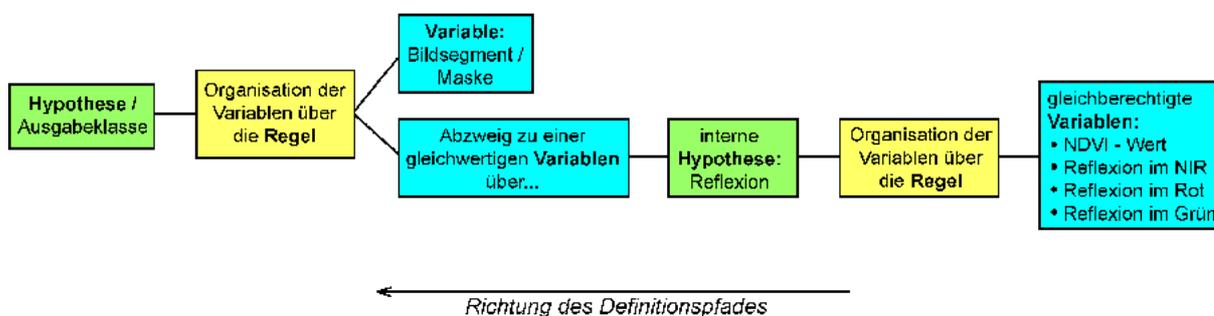


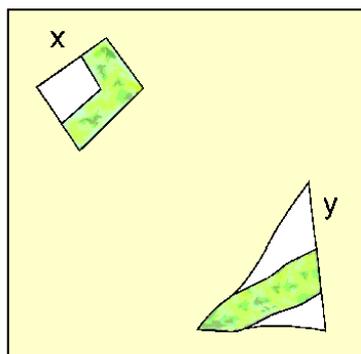
Abb. 5.12: Schematisierter Aufbau eines Entscheidungsbaumes für eine Hypothese

Dabei sind die Auswahl der geeigneten Parameter sowie die Festsetzung der Parameterausprägungen sehr aufwendig (i.d.R. Schwellenwerte). Ein wesentlicher Bestandteil des empirisch-iterativen Vorgehens ist die einzelfallbezogene datensatzorientierte Analyse der Statistiken und Histogramme. Aufbauend darauf werden für jede Ausgabeklasse nach der Auswahl der Eingangsvariablen durch stichprobenartige Analysen im gesamten Bildausschnitt die Schwellenwerte empirisch festgesetzt (vgl. Abb. 5.13). Danach erfolgt eine erste Testklassifikation,

- um die Genauigkeit der Konditionen, das heißt, die exakte Abgrenzung/Isolation dieser Klasse von anderen Klassen, zu prüfen.
- Zusätzlich wird hierüber geprüft, ob die Konditionen zu eng/zu speziell gewählt wurden; die stichprobenartige Bildanalyse wäre folglich nicht repräsentativ.

Im Ergebnis könnte eine erste Testklassifikation zwar zeigen, daß sich die neue Klasse gut von anderen Klassen isolieren läßt, aufgrund der sehr speziellen Schwellenwerte jedoch kaum Pixel dieser Klasse zugeordnet werden (vergleichbar mit b) in Abb. 5.13). Durch weitere iterative Schritte werden die Eingangsvariablen schließlich adäquat definiert. Diese Arbeiten erfordern naturgemäß einen großen Erfahrungsschatz und führen aufgrund der zum Teil sehr heterogenen Datenqualitäten häufig zu Kompromissen bei der Festsetzung der Konditionen; die Folgen der Kompromisse werden im Kapitel 6 erläutert.

a) Ausgangssituation: Klassifikation von Grünland: vegetationsverdeckt

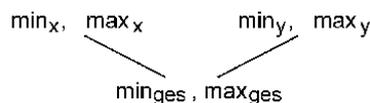


□ Maske für die Kategorie Grünland

■ vegetationsverdeckte Flächen

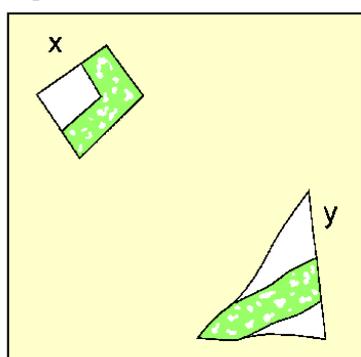
□ andere Nutzungen der Grünlandflächen

Durch empirisch-iterative Analysen der Bilddatensätze sowie der Indexbilder werden Minimum- bzw. Maximumwerte für die Grenzwerte der Eingangsvariablen festgelegt ( $\min_{ges.}$ ,  $\max_{ges.}$ ).



min. / max.: Minimum- bzw. Maximumwert zB. für NDVI - Wert, Reflexion im NIR, Rot, Grün, Blau

b) Ergebnis der ersten Testklassifikation



□ Maske für die Kategorie Grünland

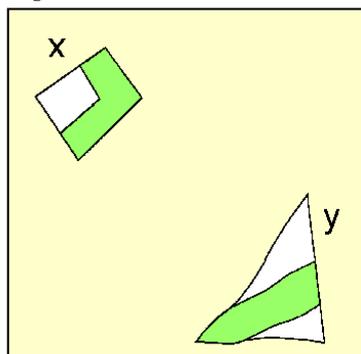
■ vegetationsverdeckt: Klassifizierte Flächen

□ andere Nutzungen der Grünlandflächen

Die Grenzwerte ( $\min_{ges.}$ ,  $\max_{ges.}$ ) sind für die Unterklasse "vegetationsverdeckt" nicht repräsentativ; die Klassifikation ist daher lückenhaft.

c) 1. Iteration: Optimierung von  $\min_{ges.}$  und  $\max_{ges.}$  durch weitere empirisch-iterative Analysen in x und y

d) Ergebnis der zweiten Testklassifikation



□ Maske für die Kategorie Grünland

■ vegetationsverdeckt: Klassifizierte Flächen

□ andere Nutzungen der Grünlandflächen

Die festgesetzten Grenzwerte erfassen die vegetationsverdeckten Bereiche der Kategorie "Grünland" optimal und grenzen diese Klasse eindeutig zu weiteren Unterklassen ab (z.B. "Versiegelt bzw. kahler Boden"). Je nach Heterogenität der analysierten Klasse können weitere Iterationsschnitte zur Optimierung der Grenzwerte erfolgen.

Abb. 5.13: Schematisiertes Organigramm des empirisch-iterativen Vorgehens

Mit dem beschriebenen Verfahren werden die Ausgabeklassen aller Datensätze definiert und letztlich über die verschiedenen Klassifikatordesigns generiert. Im folgenden werden zunächst die Designs für die Luftbildmosaike vorgestellt, bevor die wissensbasierten Klassifikatoren für die Satellitenbilddatensätze erläutert werden.

Die Designs der Klassifikatoren für die Luftbildmosaike werden aufgrund der aus DGK5-Daten kartierten Landnutzungstypen entworfen (vgl. Kap. 4.2). Demnach werden als Ausgabeklassen/Kategorien unterschieden

- Wasserflächen,
- Ackerflächen,
- Grünlandflächen,
- Straßenflächen,
- Waldflächen getrennt nach laub- und nadelwalddominierten Flächen sowie
- Mischnutzung.

Da diese Klasseneinteilung nicht auf aktuelle Veränderungen eingeht, werden diese Ausgabeklassen/Kategorien in weitere Klassen unterteilt, um mögliche aktuelle bzw. vorübergehende Variationen in den jeweiligen Kategorien erfassen zu können. Wegen der sehr verschiedenen Spektraleigenschaften des CIR- und des Color-Luftbildmosaiks unterscheiden sich die weiteren Differenzierungen der Kategorien in Unterklassen sehr deutlich voneinander; dies wird in Kapitel 5.1.2.1 dokumentiert.

Die Designs für die Satellitenbildausschnitte hingegen basieren auf dem - zum Teil modifizierten - Objektartenkatalog von ATKIS:

- Ackerland,
- Bahnanlagen, Unter- und Überführungen,
- Flächen für den Freizeitbedarf,
- Flächen mit besonderer funktionaler Bedeutung,
- Gartenland und Sonderkulturen,
- Gehölz und nasser Boden,
- Gewässer,
- Grünland,
- Heide, Moor, Moos,
- Industrie-, Gewerbe- und Sonderflächen,
- Schleusenbauwerke,
- Straßenflächen,
- Fläche: vegetationslos bzw. z. Zt. nicht bestimmbar,
- Wald, Forst und
- Wohnbauflächen.

Auch hier werden für die Kategorien weitere Unterklassen definiert, um aktuelle Variationen in den Landnutzungs- bzw. Landbedeckungsstrukturen erfassen zu können. Da drei der insgesamt vier untersuchten Satellitenbildszenen vom gleichen Sensor (TM) aufgezeichnet wurden, sind die Designs der wissensbasierten Klassifikatoren für die TM-Szenen weitestgehend identisch. Für das Design des wissensbasierten Klassifikators für die MSS-Szene wird - unter sensorspezifischen Modifikationen für die Konditionen der Eingangsvariablen - das der Landsat TM-Szene vom gleichen Datum übernommen.

Die Klassifikatoren weisen zudem einige sensorübergreifende Gemeinsamkeiten auf:

- Für die Luftbildmosaike wird aufgrund der hohen geometrischen Auflösung zusätzlich zu spektral analysierbaren Klassen die Klasse „verschattete Bereiche/Flächen“ isoliert. Diese Areale lassen keine weiterführenden Analysen und Aussagen zu und sind folglich

im Rahmen der Klassifizierung unbrauchbar/nicht relevant; um Fehlklassifikationen oder Überlagerungen dieser Bereiche zu den anderen Klassen zu vermeiden, werden sie jedoch als eigene Klasse ausgewiesen.

- Das Design des Klassifikators kann für alle Landsat TM-Szenen einheitlich gestaltet werden; lediglich für die Klassen „Wald: laubwalddominiert“ und „Wald: nadelwalddominiert“ sowie für die weiteren Unterklassen der Kategorie „Wald“ müssen szenenabhängig Modifikationen an den Eingangsvariablen vorgenommen werden (s.u.). Das Klassifikationsdesign für die Landsat MSS-Szene wird aus dem Aufbau des Klassifikators für die Landsat TM-Szenen unter starken Modifikationen der Eingangsvariablen abgeleitet (s.u.). Das ist aufgrund der abweichenden Sensorcharakteristiken zu erwarten.
- Bedingt durch die Bildeigenschaften der Szenen können für alle Datensätze neben „nicht definierten“ Arealen, also Flächen, die nicht durch die Bildsegmentationen abgedeckt sind, auch „nicht klassifizierte Bereiche“ identifiziert werden. Diese Flächen können aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften und ihrer Indexwerte nicht eindeutig isoliert und klassifiziert werden (100 % Zuverlässigkeit der Klassifikation, s.o. Kap. 4.2). In diesem Zusammenhang sei auf die beiden Klassen verschatteter Bereiche für das Color-Luftbildmosaik hingewiesen. Hier können zwei Kategorien mit sehr unterschiedlichen Reflexionseigenschaften zu einer Kategorie zusammengefaßt werden
- Klassen, die nicht vegetationsdominiert sind oder wegen ihrer geringen Flächenausdehnung keine repräsentativen Aussagen ermöglichen, werden - unabhängig von den Sensoreigenschaften - nicht differenziert auf die Vitalitätsgrade der Vegetation hin untersucht. Das bedeutet, daß für die Klassen „Wasserflächen“, „Versiegelung“ und „Mischnutzung“ der Luftbildmosaike sowie für die Klassen „Flächen mit besonderer funktionaler Bedeutung“, „Fläche: unbestimmbar bzw. vegetationslos“, „Gewässer“, „Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen“, „Schleusenbauwerke“ sowie „Wohnbauflächen“ der Satellitenbildszenen keine detaillierten Informationen zur Vitalität der Vegetation extrahiert werden.

### **5.1.2.1 Design der wissensbasierten Klassifikatoren für die Luftbildmosaike**

#### (1) Design des wissensbasierten Klassifikators für das CIR-Luftbildmosaik

Tabelle 5.1 dokumentiert die Kategorien und die dazu gebildeten Unterklassen (links) sowie die dafür definierten Eingangsvariablen (r); um eine übersichtliche Darstellung gewährleisten zu können, wird an dieser Stelle auf die Auflistung der Konditionen verzichtet.

Tab. 5.1: Klassifikator-Design für das CIR-Luftbildmosaik

<b>Kategorie und Unterklassen</b>	<b>Eingangsvariablen</b>
<b>Mischnutzung</b>	<i>Maske Mischnutzung sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bebauung, Versiegelung, kahler Boden</li> <li>• verschattete Bereiche</li> <li>• Übergang nicht vital-vital</li> <li>• vegetationsverdeckt</li> </ul>	NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion
<b>Wasserflächen</b>	<i>Wassermaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserflächen</li> <li>• trübe oder spiegelnde Wasserfl., Versiegelung, Schiffe etc.</li> <li>• vegetationsverdeckt</li> <li>• kahler Boden, trockene wenig vitale Vegetation</li> </ul>	NDVI, NIR-Reflexion NDVI, NIR-Reflexion NDVI, NIR-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion
<b>Straßenflächen</b>	<i>Straßenmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Straßenflächen</li> <li>• vegetationsverdeckt</li> </ul>	NDVI NDVI
<b>Grünland</b>	<i>Grünlandmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übergang nicht vital-vital</li> <li>• verschattet bzw. wenig vital</li> <li>• kahler Untergrund bzw. versiegelt</li> <li>• wasserverdeckt</li> <li>• „vital 0,3-&lt;0,4“ in Intervallen von 0,1 bis „vital&gt;=0,9“</li> </ul>	NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion
<b>Ackerflächen</b>	<i>Ackerflächenmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Übergang nicht vital-vital</li> <li>• verschattet, wenig vital</li> <li>• kahler Untergrund bzw. versiegelt</li> <li>• „vital 0,3-&lt;0,4“ in Intervallen von 0,1 bis „vital&gt;=0,9“</li> </ul>	NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion
<b>Nadelwald</b>	<i>Nadelwaldmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• verschattete, wenig vitale Bereiche</li> <li>• kahler Untergrund, versiegelte Flächen</li> <li>• Übergang nicht vital-vital</li> <li>• „vital 0,3-&lt;0,4“ in Intervallen von 0,1 bis „vital&gt;=0,9“</li> </ul>	NDVI, NIR-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-Reflexion NDVI, NIR-Reflexion
<b>Laubwald</b>	<i>Laubwaldmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• verschattete, wenig vitale Bereiche</li> <li>• kahler Untergrund, versiegelte Flächen</li> <li>• Übergang nicht vital-vital</li> <li>• „vital 0,3-&lt;0,4“ in Intervallen von 0,1 bis „vital&gt;=0,9“</li> </ul>	NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-Reflexion NDVI, NIR-Reflexion

Die insgesamt sieben Kategorien können zudem unterschieden werden

- in eine erste Gruppe, die vegetationsdominierte Areale aufweist sowie
- in eine zweite Gruppe, in der nicht vegetationsdominierte Flächen klassifiziert werden. Hierfür wird lediglich unterschieden, ob Flächen vegetationsbestanden bzw. vegetationsverdeckt sind oder anderweitige Landbedeckungen zeigen. Für die Gruppe „vegetationsdominiert“ werden die vegetationsverdeckten Areale auf verschiedene Vitalitätsstufen hin untersucht/klassifiziert.

Für beide Gruppen werden im folgenden stichpunktartig Besonderheiten bezüglich der Konditionen für die Eingangsvariablen aufgeführt.

Zur ersten Gruppe:

- Aufgrund der spektralen Eigenheiten der gescannten CIR-Luftbilder kann man schon ab dem NDVI-Wert von 0,3 von nennenswerter Pflanzenvitalität sprechen (vgl. Kap. 3.1). Dies wird durch empirische Untersuchungen des Datensatzes bestätigt. Für die Satellitenbilder hingegen liegt dieser Wert i.d.R. erst bei 0,5 (vgl. Kap. 4.2).
- Für die vitalitätsdifferenzierenden Unterklassen der Kategorien „Ackerflächen“ und „Grünland“ liegt der niedrigste DN-Wert im NIR bei  $\geq 130$ .
- In den Waldflächen werden laubwald- von nadelwalddominierten Flächen über den DN-Wert = 100 im NIR unterschieden.

Zur zweiten Gruppe:

- Der Grenzwert für die Unterklassen, die nur „vegetationsverdeckte“ Bereiche aufweisen, liegt bei dem Grauwert von  $\geq 100$  bis  $\geq 110$  für die NIR-Reflexion. Grundsätzlich sollte eine interne Trennung der Kategorien, die nicht vegetationsdominiert sind, in „vegetationsverdeckt“ und „nicht vegetationsverdeckt“ über den NDVI-Wert  $\geq 0,3$  und den Wert  $< 0,3$  möglich sein. Allerdings treten z.B. für die Kategorie „Wasserflächen“ Besonderheiten im Reflexionsverhalten auf (s.o.), so daß z.T. zusätzliche Parameter zur Abgrenzung der Unterklassen notwendig sind.
- Versiegelte Flächen und kahler Untergrund sind in den Waldflächen zum Aufnahmezeitpunkt der Luftbilder zum Großteil durch Baumbestand verdeckt und können quantitativ nicht sicher abgeschätzt werden.
- Lediglich die Klasse „Versiegelung/Straße“ konnte in „nur“ zwei Unterklassen „Straßenflächen“ und „Straße: vegetationsverdeckt“ unterteilt werden.

Darüber hinaus können über die generierten Unterklassen zu den einzelnen Kategorien die bereits zuvor angesprochenen Variationen/Veränderungen erfaßt werden. Dies wird im folgenden exemplarisch erläutert.

- So wird die Kategorie „Mischnutzung“ beispielsweise weiter unterteilt in die Unterklassen „Bebauung, Versiegelung, kahler Boden“, „verschattete Bereiche“, „Übergangsbereiche von nicht bzw. wenig vitaler zu vitaler Vegetation“ sowie „vegetationsverdeckt“. Diese Klassenbildung ermöglicht es, ursprünglich vegetationsbestandene Flächen, die z.B. als Kinderspielplatz oder Parkplatz stark genutzt werden, sowohl von versiegelten Flächen als auch von vegetationsverdeckten Arealen zu isolieren (vgl. Abb. 5.14).
- Für die Kategorie „Wasserflächen“ bestehen ebenfalls vier Unterklassen. Diese Einteilung ermöglicht es einerseits, den Schiffsverkehr auf dem Wesel-Datteln-Kanal als „trübe oder spiegelnde Wasserfläche, Versiegelung oder Schiffe“ von der weiteren Wasseroberfläche des Kanals zu isolieren. Andererseits werden Lageversätze zwischen dem Luftbildmosaik und den DGK5-Daten kanalbegleitend stellenweise dadurch hervorgehoben, daß „plötzlich“ Wasserflächen als „vegetationsverdeckte“ Areale klassifiziert werden.

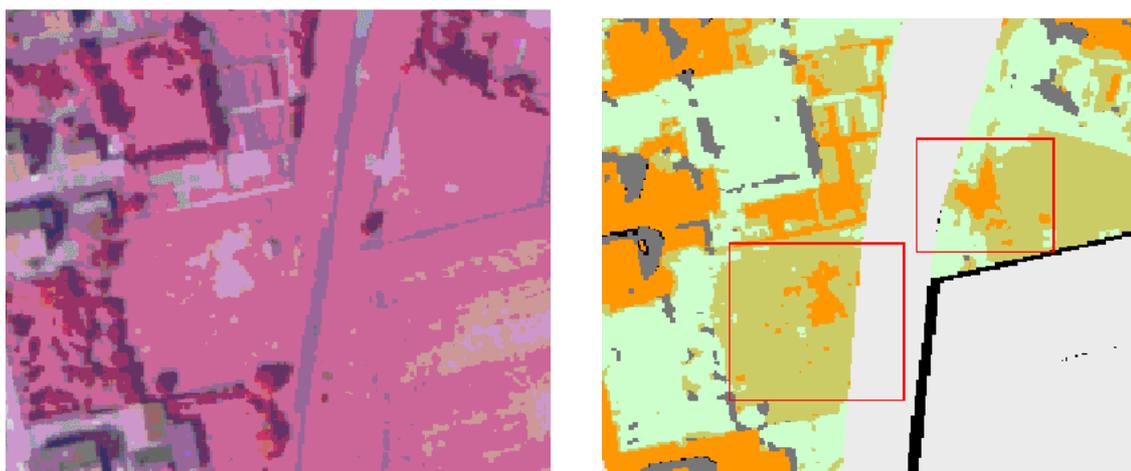


Abb. 5.14: Kategorie Mischnutzung: Wiesenflächen mit unterschiedlich starken „Abnutzungserscheinungen“ evtl. durch Nutzung der Flächen als Bolzplatz oder Parkplatz (innerhalb der markierten Flächen im rechten, klassifizierten Bildausschnitt: orange zeigt kahlen Boden an, olivgrün zeigt Übergangsbereiche zwischen nicht vitaler und vitaler Vegetation an, hellgrün zeigt vegetationsverdeckte Areale an). Grau- und schwarzgefärbte Flächen: nicht zur Kategorie Mischnutzung gehörig, nicht definierte Flächen (screenshots).

## (2) Design des wissensbasierten Klassifikators für das Color-Luftbildmosaik

Tabelle 5.2 zeigt die Unterschiede in der Generierung der Unterklassen innerhalb der einzelnen Kategorien für das Color-Luftbildmosaik im Vergleich zum CIR-Luftbildmosaik auf (zum besseren Vergleich wird die Reihenfolge der Auflistung aus Tab. 5.1 aufrechterhalten).

Die Unterschiede sind vor allem darauf zurückzuführen, daß dieses Mosaik gänzlich andere Spektraleigenschaften aufweist als das CIR-Luftbildmosaik (andere Filmeigenschaften, keine Empfindlichkeit für NIR-Reflexion, dafür aber Blau-Reflexion). Dadurch können keine Vitalitätsstufen für vegetationsdominierte Flächen unterschieden werden. Zudem können für die Waldareale aufgrund der Reflexionseigenschaften von Laub- und Nadelbäumen in Rot, Grün und Blau nur Bereiche, die laub- oder nadelwalddominiert sind, unterschieden werden.

Die weiteren Besonderheiten dieses Designs werden im folgenden stichpunktartig aufgelistet:

- Eine nennenswerte Grün-Reflexion der Vegetation besteht laut empirischer Untersuchungen ab einem RG-Indexwert von -0,1. Werte, die größer sind, verweisen auf versiegelte Flächen, kahlen Untergrund oder zum Teil auf verschattete Areale.
- Für beide Waldkategorien (Laub- und Nadelwalddominanz) werden identische Unterklassen mit überwiegend identischen Konditionen für die Eingangsvariablen erstellt. Laub- und Nadelwaldflächen werden somit in allen Waldarealen nur über den Grenzwert  $DN=90$  in der Grün-Reflexion voneinander unterschieden. Je homogener der Bestand an Laub- oder Nadelbäumen ist, desto sicherer ist die Klassifikation (vgl. Abb. 5.15). Durch geringe Bestandsdichten kommt es jedoch vor allem in nadelwald-

dominierten Flächen zu Fehlklassifikationen von Vegetation, die der Klasse „verschattete Bereiche“ zugewiesen werden (vgl. Kap. 6: Fehlerdiskussion).

Tab. 5.2: Klassifikatordesign für das Color-Luftbildmosaik

<b>Kategorie und Unterklassen</b>	<b>Eingangsvariablen</b>
<b>Mischnutzung</b>	<i>Maske Mischnutzung sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bebauung, versiegelt bzw. Boden durchscheinend</li> <li>• dunkle, verschattete bzw. sonnenabgewandte Flächen (1)</li> <li>• dunkle, verschattete bzw. sonnenabgewandte Flächen (2)</li> <li>• vegetationsverdeckt</li> </ul>	RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion
<b>Wasserflächen</b>	<i>Wassermaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Wasserflächen</li> </ul>	RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion
<b>Straßenflächen</b>	<i>Straßenmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Straßenflächen bzw. kahler Boden</li> <li>• Straßenflächen: dunkel bzw. verschattet (1)</li> <li>• Straßenflächen: dunkel bzw. verschattet (2)</li> <li>• Straßenflächen: vegetationsverdeckt</li> </ul>	RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion
<b>Grünland</b>	<i>Grünlandmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Grünland</li> <li>• durchscheinender Boden bzw. versiegelt</li> <li>• verschattete bzw. dunkel reflektierende Flächen (1)</li> <li>• verschattete bzw. dunkel reflektierende Flächen (2)</li> </ul>	RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion
<b>Ackerflächen</b>	<i>Ackerflächenmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ackerflächen: bestellt</li> <li>• durchscheinender, kahler bzw. versiegelter Boden</li> <li>• verschattete bzw. dunkel reflektierende Flächen (1)</li> <li>• verschattete bzw. dunkel reflektierende Flächen (2)</li> </ul>	RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion
<b>Nadelwalddominanz</b>	<i>Nadelwaldmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• grün reflektierend</li> <li>• dunkelgrün reflektierend</li> <li>• durchscheinender Boden, Holzanteil</li> <li>• verschattete Flächen</li> </ul>	RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion
<b>Laubwalddominanz</b>	<i>Laubwaldmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• grün reflektierend</li> <li>• dunkelgrün reflektierend (z.B. Nadelbäume)</li> <li>• durchscheinender Boden, Holzanteil</li> <li>• verschattete Flächen</li> </ul>	RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion RG-I, Rot-, Grün-, Blau-Reflexion

RG-I: Rot-Grün-Index

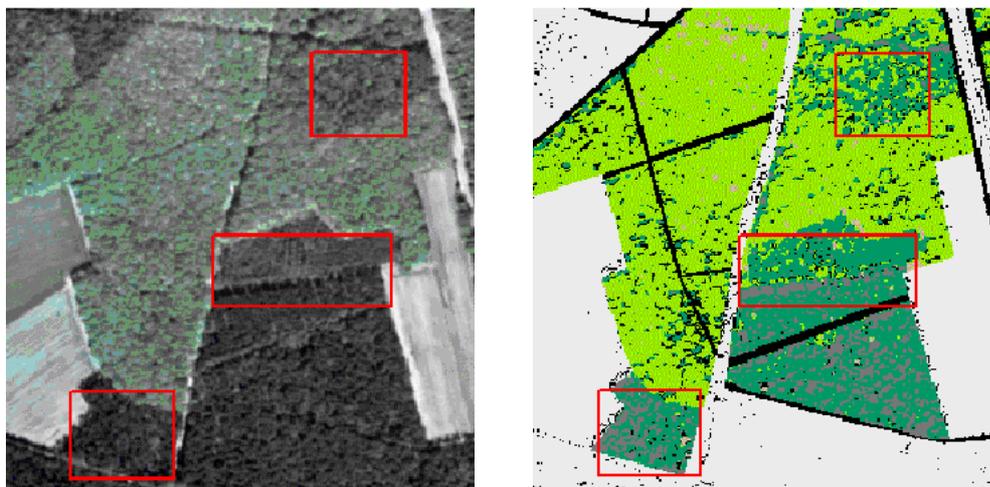


Abb. 5.15: Klassifikation der Kategorie „Laubwald“: Beispiel für eine Trennung von laub- und nadelwalddominierten Parzellen (respektive helle bzw. dunkle Grüntöne im klassifizierten Bildausschnitt rechts). In der unteren Suchbox ist der Nadelwaldbestand sehr homogen, die Suchbox in der Bildmitte zeigt den Unterschied zwischen einem homogenen Bestand (unten) und einem Mischbestand (oben), während die obere Suchbox das Problem von Mischwaldbeständen sehr gut verdeutlicht. Dunkelgrau gefärbte Flächen repräsentieren die Klasse „verschattete Bereiche“ (hellgrau- und schwarzgetönte Flächen: nicht klassifizierte bzw. nicht definierte Areale; screenshots).

- Der große Anteil von Baumholz und durchscheinendem Boden an der Reflexion der Waldflächen wird in den Teilklassifizierungen der Waldflächen ebenfalls deutlich. Dieser Effekt scheint vor allem durch die frühe phänologische Entwicklungsphase bedingt (vgl. Abb. 5.16).
- Für die Kategorien „Mischnutzung“, „Straßenflächen“, „Grünland“ und „Ackerflächen“ müssen für die verschatteten Areale zwei in ihren Charakteristiken grundsätzlich verschiedene Unterklassen generiert werden. Sie werden durch die Kenngröße von -0,1 für den RG-Indexwert voneinander abgegrenzt.
- Auch für dieses Mosaik werden Nutzungen von Vegetation, in der Regel Baumbestand, häufig verdeckt. Dies gilt vor allem für Straßenflächen in den Waldgebieten.

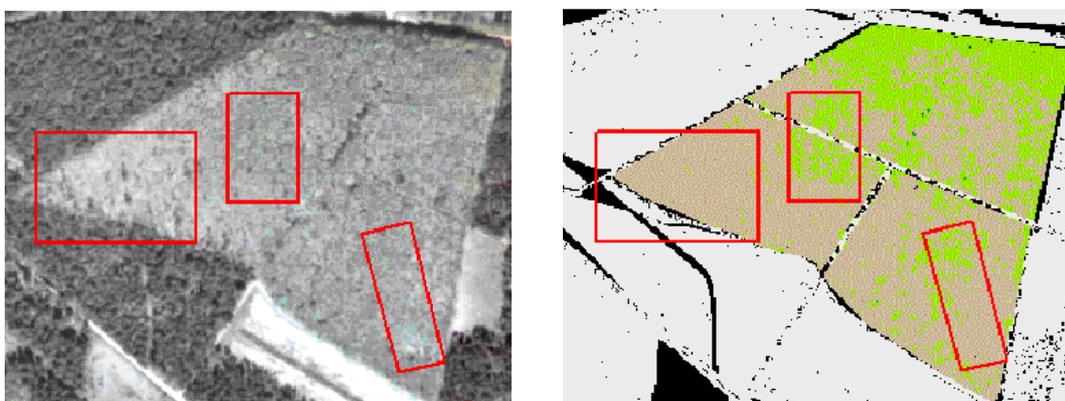


Abb. 5.16: Anteil der Reflexion von Baumholz und durchscheinendem Boden am Beispiel einer Laubwaldparzelle (hellbraune Bereiche: Dominanz von Baumholz bzw. durchscheinendem Boden; hellgrüne Bereiche: Reflexion von grüner Vegetation dominiert; hellgrau- und schwarzgetönte Flächen: nicht klassifizierte bzw. nicht definierte Areale; screenshots).

### 5.1.2.2 Design des wissensbasierten Klassifikators für die Landsat TM-Datensätze vom 01.05.1986, 17.05.1986 und 02.07.1991

Wie zuvor ausgeführt, sind die einzelnen Klassifikationsbäume aller TM-Szenen für die meisten Kategorien identisch. Durch die geringere räumliche Auflösung der Satellitenbilddaten im Vergleich zu den Luftbilddaten treten Probleme durch inhomogene Reflexionseigenschaften von Kategorien für diese Daten kaum auf.

Die Klassifikationsansätze für die Kategorie „Wald“ mit allen Unterklassen müssen jedoch - bedingt durch die unterschiedlichen phänologischen Stadien - individuell für jedes Aufnahmedatum konzipiert werden (vgl. oben). Die entsprechenden Klassifikationsdesigns werden unter 5.1.2.3 separat vorgestellt und erläutert.

Tabelle 5.3 dokumentiert für alle TM-Szenen die Kategorien, die dazugehörigen Unterklassen sowie die benutzten Eingangsvariablen zur Definition der einzelnen Klassen. Aus der Tabelle ist ersichtlich, daß sich die Kategorien - wie schon zuvor für das CIR-Luftbildmosaik - ebenfalls einteilen lassen in

1. eine Gruppe, die nicht vegetationsdominierte Klassen umfaßt und entsprechend keine Vitalitätsstufen unterscheidet, und
2. eine zweite Gruppe, die vegetationsdominiert ist und folglich Unterklassen nach Vitalitätsgraden differenziert.

Für beide Gruppen werden nachfolgend die spezifischen Konditionen für die Eingangsvariablen erläutert.

Zu 1: nicht vegetationsdominiert

- Die Kategorien „Flächen mit besonderer funktionaler Bedeutung“, „Fläche: vegetationslos bzw. unbestimmbar“, „Schleusenbauwerke“, „Wohnbaufläche“ werden demnach in vegetationsverdeckte Areale und solche, die versiegelt sind bzw. als kahle Flächen angesprochen werden können, unterschieden. Durch empirische Analysen der Datensätze werden vegetationsverdeckte von vegetationslosen Flächen durch den NDVI-Wert 0,5 voneinander getrennt (vgl. auch die Untersuchungen von MINO, SAITO & OGAWA 1998, S. 445 f.; LYON et al. 1998, S. 147 ff., WASHINGTON-ALLEN et al. 1998, S. 1326, SU 1998, S. 102 ff.).
- Dieser Parameter (NDVI-Wert) muß für die Kategorien „Gewässer“, „Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen“ durch Eingangsvariablen erweitert werden, damit die entsprechenden Unterscheidungen in „vegetationsverdeckt“ und „vegetationslos“ möglich sind. Zusätzlich sind für die Kategorie „Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen“ die Unterklassen „Wasserflächen“ und „vernässte Bereiche“ von den vegetationslosen Flächen zu unterscheiden. Dies geschieht über den DN-Wert 20 für Rot zur Trennung von Wasserflächen und versiegelten Flächen.
- Für die Kategorie „Gewässer“ werden Wasserflächen von versiegelten Bereichen/kahle Flächen durch den DN-Schwellenwert von 30 im Grün und Rot getrennt. Zusätzlich wird Vegetation von Wasser durch den Wert 69 im NIR unterschieden.
- Nennenswerte Vegetation liegt ab einem NDVI-Wert von  $\geq 0,5$  vor (vgl. oben).

Tab. 5.3: Klassifikatordesign für die Landsat TM-Szenen vom 01.05.1986, 17.05.1986 und 02.07.1991

<b>Kategorie und Unterklassen</b>	<b>Eingangsvariablen</b>
<b>Gewässer</b>	<i>Gewässermaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gewässer</li> <li>• Sandflächen bzw. kahler Boden</li> <li>• vegetationsverdeckt</li> </ul>	NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-Reflexion
<b>Wohnbauflächen</b>	<i>Wohnbauflächenmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• versiegelt bzw. kahler Boden</li> <li>• vegetationsverdeckt</li> </ul>	NDVI NDVI
<b>Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen</b>	<i>Industriemaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen</li> <li>• Wasserflächen bzw. vernässt</li> <li>• vegetationsverdeckt bzw. Vegetation</li> </ul>	NDVI, Rot-Reflexion NDVI, Rot-Reflexion NDVI
<b>Schleusenbauwerke</b>	<i>Schleusenmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• versiegelt bzw. kahler Boden</li> <li>• vegetationsverdeckt bzw. Vegetation</li> </ul>	NDVI NDVI
<b>Flächen: vegetationslos bzw. z.Zt. unbestimmbar</b>	<i>Maske: vegetationslos bzw. unbestimmbar sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• vegetationslos bzw. unbestimmbar</li> <li>• Vegetation</li> </ul>	NDVI NDVI
<b>Bahnanlagen, Unter- und Überführungen</b>	<i>Maske Bahnanlagen sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• versiegelt bzw. kahler Boden</li> <li>• „Vegetation 0,5-&lt;0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „Vegetation&gt;=0,9“</li> </ul>	NDVI NDVI
<b>Flächen für den Freizeitbedarf</b>	<i>Maske Freizeitbedarf sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• versiegelt bzw. kahler Boden</li> <li>• Wasserflächen</li> <li>• Nadelwald bzw. verschattete Flächen</li> <li>• „Vegetation 0,5-&lt;0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „Vegetation&gt;=0,9“</li> </ul>	NDVI, Rot-Reflexion NDVI, Rot-Reflexion NDVI, NIR-Reflexion NDVI, NIR-Reflexion
<b>Gartenland, Sonderkulturen</b>	<i>Maske Gartenland/Sonder. sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kahler Boden bzw. versiegelt</li> <li>• „vital 0,5-&lt;0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „vital&gt;=0,9“</li> </ul>	NDVI NDVI
<b>Grünland</b>	<i>Grünlandmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kahler Boden bzw. versiegelt</li> <li>• „vital 0,5-&lt;0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „vital&gt;=0,9“</li> </ul>	NDVI NDVI
<b>Ackerland</b>	<i>Maske Ackerland sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kahler Boden bzw. versiegelt</li> <li>• „vital 0,5-0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „vital&gt;=0,9“</li> </ul>	NDVI NDVI
<b>Heide, Moor, Moos</b>	<i>Heide-Moor-Moos-Maske</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kahler Boden bzw. versiegelt</li> <li>• „vital 0,5-&lt;0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „vital&gt;=0,9“</li> </ul>	NDVI NDVI
<b>Gehölz und nasser Boden</b>	<i>Maske Gehölz sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kahler Boden bzw. versiegelt</li> <li>• „vital 0,5-&lt;0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „vital&gt;=0,9“</li> </ul>	NDVI NDVI
<b>Flächen m. besonderer funktionaler Bedeutung</b>	<i>Maske: Fläche m.bes. Bed. sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kahler Boden bzw. versiegelt</li> <li>• Vegetation</li> </ul>	NDVI NDVI

Zu 2: vegetationsdominiert

- Die Kategorien „Ackerland“, „Bahnanlagen, Unter- und Überführungen“, „Gartenland/Sonderkultur“, „Gehölz/nasser Boden“, „Grünland“, „Heide, Moor, Moos“ werden als vegetationsdominierte Klassen in den Vitalitätsgraden weiter differenziert (vgl. Tab. 5.3). Die Klassen werden durch NDVI-Werte zwischen  $<0,5$  für kahle/versiegelte Bereiche und in Intervallgrößen von 0,1 für den Wertebereich 0,5 bis  $\geq 0,9$  für vegetationsverdeckte Areale unterteilt. Nennenswerte vitale Vegetation wird ab einem NDVI-Wert von 0,5 diagnostiziert.
- Die Kategorie „Freizeitbedarf“ umfaßt sehr unterschiedliche Unterklassen und wird neben Klassen, die nach Vitalitätsgraden über den Wertebereich von 0,5 bis  $\geq 0,9$  gestuft sind, weiter unterteilt in „kahle/versiegelte Bereiche“, „Wasserflächen“ und „Nadelwald bzw. verschattete Areale“ (vgl. Tab. 5.3). Aufgrund empirischer Untersuchungen wird als Grenzwert für die Unterscheidung von Wasserflächen und „Nicht-Wasserflächen“ im Rot der DN-Wert auf 15 festgelegt.

### **5.1.2.3 Design des wissensbasierten Klassifikators für die Kategorie „Wald“ der Landsat TM-Szenen vom 01.05.1986, 17.05.1986 und 02.07.1991**

In Tabelle 5.4 werden die Designs der Kategorie „Wald“ für die drei TM-Szenen vergleichend dokumentiert. Die Aufstellung zeigt, daß für die Szene vom 17.05.1986 die NDVI-Werte

- für die Isolation von „Vegetation außer Wald“ sowie
- die jeweils unterste Vitalitätsklasse von laub- und nadelwalddominierten Flächen

auf 0,4 festgesetzt sind. Dieser abweichende Grenzwert wird durch die abweichenden Spektraleigenschaften dieser Szene - die nicht jahreszeitlich bedingt sind, sondern trotz Atmosphärenkorrektur durch den Einfluß der Atmosphäre auftreten (vgl. Kap. 3.2) - notwendig (nennenswerte Vegetation wird i.d.R. ab einem NDVI-Wert von 0,5 diagnostiziert; vgl. die Ausführungen weiter oben).

Darüber hinaus sind weitere Spezifikationen für die Konditionen der Eingangsvariablen erforderlich; Tabelle 5.5 stellt detailliert die Grenzwerte der betroffenen Klassen für die TM-Szenen vom 01.05.1986 und 02.07.1991 (links) und die Szene vom 17.05.1986 (rechts) gegenüber.

Tab. 5.4: Klassifikatordesign für die Kategorie „Wald“ der drei Landsat TM-Szenen vom 01.05.1986, 17.05.1986 und 02.07.1991

Kategorie und Unterklassen	Eingangsvariablen
<b>Landsat TM-Szene vom 01.05.1986: Wald</b>	<i>Waldmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kahler Boden bzw. versiegelt</li> <li>• Übergang nicht vital-vital</li> <li>• Vegetation außer Wald, vital<math>\geq</math>0,6</li> <li>• laubwalddominiert vital 0,5-&lt;0,6 in Intervallen von 0,1 bis laubwalddominiert vital<math>\geq</math>0,9</li> <li>• nadelwalddominiert vital 0,5-&lt;0,6 in Intervallen von 0,1 bis nadelwalddominiert vital<math>\geq</math>0,9</li> </ul>	NDVI NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion
<b>Landsat TM-Szene vom 17.05.1986: Wald</b>	<i>Waldmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kahler Boden bzw. versiegelt</li> <li>• Übergang nicht vital-vital</li> <li>• Vegetation außer Wald, vital<math>\geq</math>0,4</li> <li>• laubwalddominiert vital 0,4-&lt;0,6 und weiter in Intervallen von 0,1 bis laubwalddominiert vital<math>\geq</math>0,9</li> <li>• nadelwalddominiert vital 0,4-&lt;0,6 und weiter in Intervallen von 0,1 bis nadelwalddominiert vital<math>\geq</math>0,9</li> </ul>	NDVI NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion
<b>Landsat TM-Szene vom 02.07.1991: Wald</b>	<i>Waldmaske sowie</i>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• kahler Boden bzw. versiegelt</li> <li>• Übergang nicht vital-vital</li> <li>• Vegetation außer Wald, vital<math>\geq</math>0,6</li> <li>• laubwalddominiert vital 0,5-&lt;0,6 in Intervallen von 0,1 bis laubwalddominiert vital<math>\geq</math>0,9</li> <li>• nadelwalddominiert vital 0,5-&lt;0,6 in Intervallen von 0,1 bis nadelwalddominiert vital<math>\geq</math>0,9</li> </ul>	NDVI NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion

Tab. 5.5: Gegenüberstellung der Spezifikationen der Eingangsvariablen für die Kategorie „Wald“ der drei Landsat TM-Szenen

betroffene Klassen	Definition der Eingangsvariablen (Schwellenwerte)	
	TM-Szenen v. 01.05.1986,02.07.1991	TM-Szene vom 17.05.1986
kahler Boden bzw. versiegelt	NDVI <0,5	NDVI <0,3
Übergang nicht vital-vital	0,5 $\leq$ NDVI<0,6, DN in Rot, Grün $\geq$ 20, im NIR $\geq$ 60	0,3 $\leq$ NDVI<0,4, DN in Grün, Rot $\geq$ 25, im NIR $\geq$ 50
Vegetation außer Wald, vital $\geq$ x	NDVI $\geq$ 0,6, DN in Grün, Rot $\geq$ 20, im NIR $\geq$ 60	NDVI $\geq$ 0,4, DN in Grün, Rot $\geq$ 25, im NIR $\geq$ 50
laubwalddominiert vital 0,4-<0,6 bzw. 0,5-<0,6 danach in Intervallen von 0,1 bis vital $\geq$ 0,9	0,5 $\leq$ NDVI<0,6 usw., DN in Grün, Rot <20, im NIR >65	0,4 $\leq$ NDVI<0,6; 0,6 $\leq$ NDVI<0,7 usw., DN in Grün, Rot <25, im NIR >50
nadelwalddominiert vital 0,4-<0,6 bzw. 0,5-<0,6 danach in Intervallen von 0,1 bis vital $\geq$ 0,9	0,5 $\leq$ NDVI<0,6 usw., DN in Grün, Rot <20, im NIR <66	0,4 $\leq$ NDVI<0,6; 0,6 $\leq$ NDVI<0,7 usw., DN in Grün, Rot <25, im NIR <51

Die Tabelle zeigt, daß geringfügige Unterschiede bei den Grenzwerten für die NDVI-Werte sowie für die Festsetzungen der DN-Werte in Grün und Rot (20 zu 25) und im NIR (60 zu 50, 65 zu 50, 66 zu 51) bestehen.

#### **5.1.2.4 Design des wissensbasierten Klassifikators für die Landsat MSS-Szene vom 02.07.1991**

Wie Tabelle 5.6 dokumentiert, ist für diese Szene das Design des wissensbasierten Klassifikators der Landsat TM-Szene vom 02.07.1991 übernommen worden. Daher wird auch für diese Szene die Unterteilung in vegetationsdominierte und nicht vegetationsdominierte Klassen beibehalten; zumal die Klassifizierungen zeigen, daß diese Klassenbildungen sinnvoll sind (vgl. Kap. 4.2 und 5.1.3).

Allerdings müssen die Konditionen für die Eingangsvariablen sensorabhängig modifiziert werden. Diese Spezifikationen beziehen sich ausschließlich auf die Festsetzungen der Reflexionswerte in Grün, Rot und im NIR für die Unterklassen in den Kategorien „Flächen für den Freizeitbedarf“, „Gewässer“, „Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen“ und „Wald“. Damit werden Änderungen sowohl für vegetationsdominierte Klassen, als auch solche, die durch andere Nutzungen bestimmt sind, vorgenommen. Tabelle 5.7 zeigt eine vergleichende Gegenüberstellung der DN-Werte für die betroffenen Klassen; NDVI-Werte, die zum Teil auch Klassen differenzieren, sind nicht aufgeführt.

Für die Grenzwerte in Grün und NIR werden bei der MSS-Szene im allgemeinen deutlich höhere DN's festgesetzt als für die TM-Szene vom gleichen Datum. Dafür dürften die geringfügig abweichenden Kanalspezifikationen verantwortlich sein (Breite und Lage der Kanäle im elektromagnetischen Spektrum; vgl. auch Tab. A.1, Anhang A).

An dieser Stelle sei nochmals darauf verwiesen, daß die wissensbasierte Klassifikation für die MSS-Szene nur für Versuchszwecke durchgeführt wird, da die Geocodierung und die Verbesserung der Detailschärfe gezeigt haben, daß die Daten mit einem systematischen Fehler behaftet sind, der nicht beseitigt werden kann. Hinzu kommt die vergleichsweise schlechte Bodenauflösung des Originaldatensatzes (vgl. Kap. 3.2).

Tab. 5.6: Klassifikatordesign für die Landsat MSS-Szene vom 02.07.1991

<b>Kategorie und Unterklassen</b>	<b>Eingangsvariablen</b>
<b>Ackerland</b>	<i>Maske Ackerland sowie</i>
• kahler Boden bzw. versiegelt	NDVI
• „vital 0,5-<0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „vital>=0,9“	NDVI
<b>Bahnanlagen, Unter- und Überführungen</b>	<i>Maske Bahnanlagen sowie</i>
• versiegelt bzw. kahler Boden	NDVI
• „Vegetation 0,5-<0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „Vegetation>=0,9“	NDVI
<b>Flächen m. besonderer funktionaler Bedeutung</b>	<i>Maske: Fläche m.bes. Bed. sowie</i>
• kahler Boden bzw. versiegelt	NDVI
• Vegetation	NDVI
<b>Flächen: vegetationslos bzw. z.Zt. unbestimmbar</b>	<i>Maske: vegetationslos bzw. unbestimmbar sowie</i>
• vegetationslos bzw. unbestimmbar	NDVI
• Vegetation	NDVI
<b>Flächen für den Freizeitbedarf</b>	<i>Maske Freizeitbedarf sowie</i>
• versiegelt bzw. kahler Boden	NDVI, Rot-Reflexion
• Wasserflächen	NDVI, Rot-Reflexion
• Nadelwald bzw. verschattete Flächen	NDVI, NIR-Reflexion
• „Vegetation 0,5-<0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „Vegetation>=0,9“	NDVI, NIR-Reflexion
<b>Gartenland, Sonderkulturen</b>	<i>Maske Gartenland/Sonderkultur sowie</i>
• kahler Boden bzw. versiegelt	NDVI
• „vital 0,5-<0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „vital>=0,9“	NDVI
<b>Gehölz und nasser Boden</b>	<i>Maske Gehölz sowie</i>
• kahler Boden bzw. versiegelt	NDVI
• „vital 0,5-<0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „vital>=0,9“	NDVI
<b>Gewässer</b>	<i>Gewässermaske sowie</i>
• Gewässer	NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion
• Sandflächen bzw. kahler Boden	NDVI, Rot-, Grün-Reflexion
• vegetationsverdeckt	NDVI, NIR-Reflexion
<b>Grünland</b>	<i>Grünlandmaske sowie</i>
• kahler Boden bzw. versiegelt	NDVI
• „vital 0,5-<0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „vital>=0,9“	NDVI
<b>Heide, Moor, Moos</b>	<i>Heide-Moor-Moos-Maske</i>
• kahler Boden bzw. versiegelt	NDVI
• „vital 0,5-<0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „vital>=0,9“	NDVI
<b>Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen</b>	<i>Industriemaske sowie</i>
• Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen	NDVI, Rot-Reflexion
• Wasserflächen bzw. vernässt	NDVI, Rot-Reflexion
• vegetationsverdeckt bzw. Vegetation	NDVI
<b>Schleusenbauwerke</b>	<i>Schleusenmaske sowie</i>
• versiegelt bzw. kahler Boden	NDVI
• vegetationsverdeckt bzw. Vegetation	NDVI
<b>Wald</b>	<i>Waldmaske sowie</i>
• kahler Boden bzw. versiegelt	NDVI
• Übergang nicht vital-vital	NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion
• Vegetation außer Wald, vital>=0,6	NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion
• laubwalddominiert vital 0,5-<0,6 in Intervallen von 0,1 bis laubwalddominiert vital>=0,9	NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion
• nadelwalddominiert vital 0,5-<0,6 in Intervallen von 0,1 bis nadelwalddominiert vital>=0,9	NDVI, NIR-, Rot-, Grün-Reflexion
<b>Wohnbauflächen</b>	<i>Wohnbauflächenmaske sowie</i>
• versiegelt bzw. kahler Boden	NDVI
• vegetationsverdeckt	NDVI

Tab. 5.7: Vergleich der Klassen, in denen die Schwellenwerte für die Reflexion in Grün, Rot und NIR zur Definition der Eingangsvariablen benutzt werden; Landsat TM- und -MSS-Szene vom 02.07.1991

<b>betroffene Kategorien und Unterklassen</b>	<b>Landsat TM-Szene</b>	<b>Landsat MSS-Szene</b>
<b>Flächen für den Freizeitbedarf</b>		
• versiegelt bzw. kahler Boden	Rot >15	Rot >20
• Wasserflächen	Rot <=15	Rot <=20
• Nadelwald bzw. verschattete Flächen	NIR <70	NIR <100
• „Vegetation 0,5-<0,6“ in Intervallen von 0,1 bis „Vegetation>=0,9“	NIR>=70	NIR >=100
<b>Gewässer</b>		
• Gewässer	Grün, Rot <=30, NIR <69	Grün <=80, Rot <=45, NIR <130
• Sandflächen bzw. kahler Boden	Grün, Rot >30	Grün >80, Rot >45
• vegetationsverdeckt	NIR >=69	NIR >=130
<b>Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen</b>		
• Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen	Rot >=20	Rot >=30
• Wasserflächen bzw. vernässt	Rot <20	Rot <30
<b>Wald</b>		
• Übergang nicht vital-vital	Grün, Rot >=20, NIR >=60	Grün >=55, Rot >=25, NIR >=60
• Vegetation außer Wald, vital>=0,6	Grün, Rot >=20, NIR >=60	Grün >=55, Rot >=25, NIR >=60
• laubwalddominiert vital 0,5-<0,6 in Intervallen von 0,1 bis laubwalddominiert vital>=0,9	Grün, Rot <20, NIR >65	Grün <55, Rot <25, NIR >105
• nadelwalddominiert vital 0,5-<0,6 in Intervallen von 0,1 bis nadelwalddominiert vital>=0,9	Grün, Rot <20, NIR <66	Grün <55, Rot <25, NIR <106

### 5.1.3 Wissensbasierte Klassifikationen der einzelnen Fernerkundungsdatensätze

Die wissensbasierten Klassifikationen je Fernerkundungsdatensatz dokumentieren sehr detailliert den Ist-Zustand des Untersuchungsgebietes zu den gegebenen Aufnahmezeitpunkten. Damit stellen die Einzelbildklassifikationen wertvolle komplementäre Informationen zusätzlich zu konventionell generierten Daten für Umweltmonitoringfragen bereit. Fehlereinflüsse und/oder Unsicherheiten in der Zuordnung von Objekten zu vordefinierten Klassen, wie sie bei konventionellen Klassifizierungen auftreten, können über den wissensbasierten Ansatz eliminiert werden (vgl. Kap. 4.2).

Zudem ermöglichen die wissensbasierten Klassifikationen eine erste Quantifizierung von Veränderungen (in ha). Über die Einzelbildklassifikationen hinaus kann somit untersucht werden, ob die durch eine Klasse beanspruchte Flächensumme im Vergleich der verschiedenen Zeitschnitte zu- oder abgenommen hat. Zeigen sich deutliche Differenzen in den Flächensummen zweier analysierter Datensätze (i.d.R. ab ca. 5 ha), so sind aufbauende Veränderungsanalysen durchzuführen; andernfalls erübrigen sich weitere Untersuchungen zu Veränderungen. Die Veränderungsanalysen sind dann mit Hilfe der vorliegenden wissensbasierten Einzelbildklassifikationen durchzuführen.

Allerdings sind die Quantifizierungen (vgl. nachfolgende Tab. 5.8 bis 5.29) fehlerbehaftet und können dadurch nur der Trendanalyse dienen. Die Fehler werden vor allem durch zwei Umstände hervorgerufen:

1. Die sehr unterschiedlichen phänologischen Stadien der Vegetation für die analysierten Datensätze überlagern eventuell tatsächlich stattgefundenen Veränderungen so stark, daß diese Veränderungen allein auf Basis der Quantifizierungen nicht isoliert werden können. So ist beispielsweise eine vermeintliche Zunahme der laubwald-dominierten Gesamtfläche vom 01.05.1986 bis zum 17.05.1986 und 02.07.1991 nicht primär damit zu erklären, daß tatsächlich die laubwaldbestandenen Flächen zugenommen haben. Vielmehr tritt dieses Phänomen vor allem bedingt durch die phänologischen Stadien der Laubbäume auf. Sie werden anfänglich aufgrund ihres Spektralverhaltens mehrheitlich fälschlicherweise der Klasse „Übergang nicht vital-vital“ zugeordnet. Mit fortschreitender Phänologie werden Laubbäume mehr und mehr „richtig“ klassifiziert, das heißt, sie werden aufgrund ihres veränderten Spektralverhaltens den Klassen „laubwald-dominiert“ in unterschiedlichen Vitalitätsstufen zugewiesen. Tatsächlich durchgeführte Aufforstungen von Laubwaldarealen zwischen 1986 und 1991 werden hiervon z.B. gänzlich überlagert und sind nicht zu detektieren.
2. Mit fortschreitender Phänologie verdeckt die Vegetation, insbesondere der Baumbestand, weitere Objekte, die andersartige Landnutzungs- bzw. Landbedeckungsstrukturen charakterisieren. Dieser Umstand führt in der Regel zu einer Unterschätzung der Flächeninanspruchnahme dieser Objekte bzw. der dazugehörigen Klassen.

Dieses Problem kann durch eine Veränderungsanalyse jedoch weitgehend eingegrenzt werden; die Ergebnisse der exemplarisch durchgeführten Untersuchungen werden in Kapitel 5.1.4 vorgestellt.

Insgesamt zeichnen sich die wissensbasierten Einzelbildklassifikationen jedoch durch folgende Kriterien aus:

- Sie dokumentieren sehr zuverlässig den Ist-Zustand des Untersuchungsraums zum Aufnahmezeitpunkt.
- Sie ermöglichen eine erste Quantifizierung von Veränderungen innerhalb gleicher oder rekodierter und zusammengefaßter Klassen (vgl. Kap. 4.2) und induzieren je nach Flächen-größen der festgestellten Veränderungen aufbauende Veränderungsanalysen.
- Sie bilden die Grundlage für die Veränderungsanalysen.

Wie bereits zuvor ausgeführt, erfolgt die Kategorisierung für die Klassifizierungen auf Basis der DGK5-Daten und in enger Anlehnung an den Objektartenkatalog der ATKIS-Daten. Demzufolge werden auch Kategorien, die nur recht kleine Flächenausdehnungen aufweisen wie z.B. „Gartenland/Sonderkulturen“ oder „Schleusenbauwerke“ einzeln ausgewertet. Diese Vorgehensweise ist Bestandteil eines erstmalig in dieser Form entwickelten wissensbasierten Klassifikationsansatzes; ob sich diese Einteilung auch für zukünftige Analysen empfiehlt, wird fallweise entschieden werden müssen und zudem vom jeweiligen Auftrag mit bestimmt werden.

Mit Hilfe der Masken können die Bilddatensätze nach vorgegebenen Landnutzungs-/ Landbedeckungsklassen segmentiert werden (vgl. Kap. 5.1.2). Die Klassifikationen weisen für alle Datensätze folgende Gemeinsamkeiten auf:

- Die Einzelklassifikationen zeigen neben den klassifizierten Bereichen auch andere Areale an. Die weißen oder schwarzen Flächen kennzeichnen zum einen Areale, die nicht über die Masken definiert sind. Darüber hinaus repräsentieren sie Bereiche, die über die Klassifikationsansätze nicht erfaßt werden können, obwohl sie Teil der Masken sind (100 % Klassifikationsgenauigkeit ist gefordert). Die hellgrau unterlegten Bereiche hingegen sind über Masken erfaßt, aber nicht Bestandteil der aktuell durchgeführten Klassifikation (vgl. Abb. 5.17).
- Die klassifizierten Gebiete werden in ihren Flächenanteilen auf gerundete Hektar (ha) dokumentiert. Flächengrößen von unter einem Hektar (ha) sind nicht mehr ausgewiesen; sie können in den Karten jedoch vereinzelt klassifiziert worden sein (bei einer Flächengröße von unter 0,5 ha: keine Hektardokumentation laut Programm; ab 0,5 ha Aufrundung auf 1 ha). Dabei zeigt die Differenz aus „laut Maske klassifizierbare Fläche“ und „tatsächlich klassifizierte Fläche“ an, wie flächendeckend die Klassifikationen je Kategorie sind. Da nicht alle Flächen mit der geforderten Genauigkeit von 100 % klassifiziert werden konnten (s.o. Kap. 4.2), sind Einzelklassifikationen an einigen Stellen lückenhaft (vgl. Fehlerdiskussion Kap. 6, s. Abb. 5.17).
- Die Klassifikationsergebnisse für das CIR- und das Color-Luftbildmosaik werden unabhängig voneinander vorgestellt. Im Gegensatz dazu werden die Klassifikationsergebnisse der Satellitenbildszenen nach Kategorien und nicht nach Datensätzen geordnet aufgeführt. Pro Kategorie erfolgt eine chronologische Zusammenstellung der Ergebnisse (01.05.1986 - 17.05.1986 - 02.07.1991).

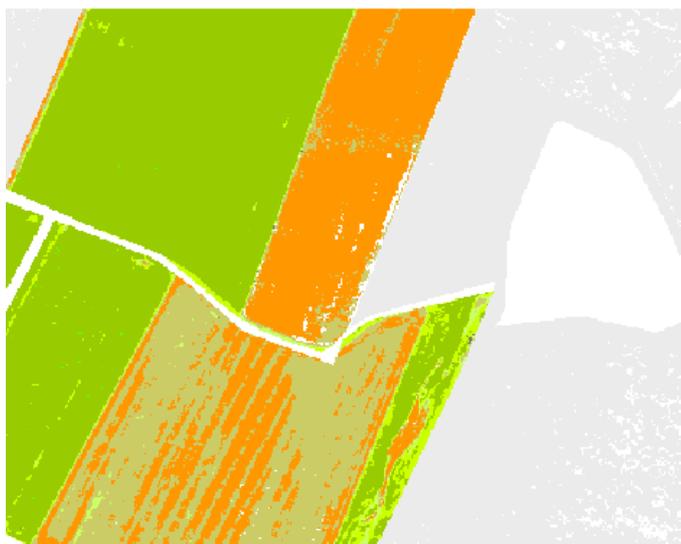


Abb. 5.17: Beispiele für nicht definierte (weiß) bzw. nicht klassifizierte Bereiche (hellgrau): Klassifikation der Kategorie „Ackerflächen“ des CIR-Luftbildmosaiks (screenshot).

### 5.1.3.1 Wissensbasierte Klassifikation des CIR-Luftbildmosaiks

#### (1) Kategorie „Mischnutzung“

Die Maske für diese Kategorie konzentriert sich auf Bereiche mit Wohnbebauung und die dazugehörigen Grundstücke, die häufig als Garten genutzt werden. In dem Luftbildmosaik werden demnach von Westen nach Osten die Ortschaften Hamm, Bossendorf sowie Ausläufer von Flaesheim durch die Maske erfaßt. Dazu gehören auch das Forsthaus Haard an der B 51 im Süden des Mosaiks sowie Teile des ADAC-Trainingsplatzes im Nordwesten des Bildausschnitts (vgl. Karte A.1, Anhang A).

Dominiert wird diese Kategorie durch Vegetation, die mit 28 ha den größten Teil der klassifizierbaren Fläche einnimmt (56 ha). Die Klassen „Vegetation Übergang nicht vital-vital“ (6 ha) und „bebaute bzw. versiegelte/kahle Flächen“ (13 ha) beanspruchen zusammen 19 ha klassifizierte Fläche. Verschattete Bereiche nehmen nur 7 ha in Anspruch. Sie treten bevorzugt an Baumreihen auf, die an Nutzungsgrenzen verstandortet sind. Darüber hinaus kommt es in der Nachbarschaft von Bebauung zu kleingekammerten verschatteten Zonen. Zusätzlich werden in der Kategorie „Mischnutzung“ vereinzelt Hausdächer je nach Baumaterial und Winkel zur Sonne respektive zur Kamera, fälschlicherweise als verschattet oder der Klasse „Übergang nicht vital-vital“ zugewiesen; diese Aspekte werden in Kapitel 6 diskutiert. Von 56 ha klassifizierbarer Fläche in diesem Bildsegment werden 54 ha insgesamt klassifiziert.

#### (2) Kategorie „Wasserflächen“

Diese Kategorie konzentriert sich räumlich auf den Wesel-Datteln-Kanal sowie die Lippe. Im Norden des Mosaiks sind zudem Teile der Filterbecken der Wasseraufbereitungsanlage sichtbar. Wegen der verschiedenen Oberflächenreflexionen werden insgesamt vier Unterklassen unterschieden. Neben Wasserflächen, Vegetation und versiegelten/kahlen Bereichen können „trübe, spiegelnde Wasserflächen bzw. Schiffe, Versiegelung“ ausgeschieden werden. In dieser Klasse werden somit durch den Schiffsverkehr aufgewühlte Wasserflächen, Brückenbauten und trübe Wasserflächen zusammengefaßt (z.B. in den Filterbecken; vgl. auch Abb. 5.18).

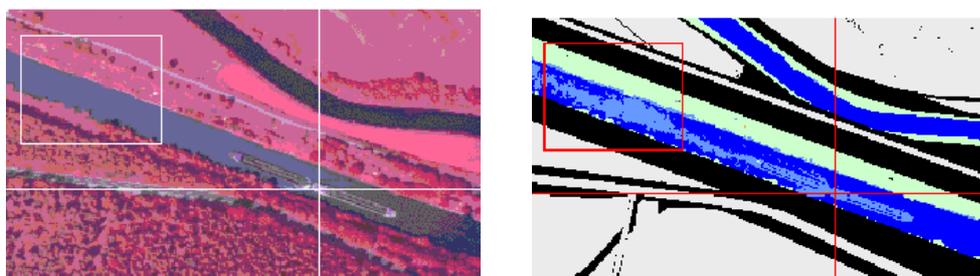


Abb. 5.18: Kategorie „Wasserflächen“ für das CIR-Luftbildmosaik, Unterklasse „trübe oder spiegelnde Wasserflächen“. Mit der Suchbox sind aufgewirbelte Wasserflächen markiert, das Fadenkreuz hebt Schiffskörper hervor (hellblau gefärbte Bereiche im klassifizierten Bild rechts; screenshots).

Aufgrund der stellenweise schlechten Paßgenauigkeit der Maske (s.o.) wird mit 9 ha ein recht hoher Anteil an vegetationsbestandenen Flächen diagnostiziert. Zudem zeigen die Filterbecken relativ große Flächen an, die mit Wasserpflanzen bedeckt sind. Trübe bzw. spiegelnde Wasserflächen sowie versiegelte/kahle Bereiche nehmen mit insgesamt 3 ha einen kleinen Teil der gesamten klassifizierten Fläche von 29 ha in Anspruch. Mit insgesamt 17 ha dominieren erwartungsgemäß Wasserflächen diese Klasse.

### (3) Kategorie „Straßenflächen“

Diese Kategorie wird über den wissensbasierten Klassifikator flächendeckend klassifiziert (35 ha). Weite Teile der Straßenflächen können als versiegelte/kahle Bereiche isoliert werden (21 ha). Nur wenige Straßen verlaufen in den Waldarealen, die zum Großteil mit nicht versiegelten Wirtschaftswegen durchzogen sind. Die Straßen, die innerhalb der Waldareale liegen, werden in der Mehrzahl der Fälle durch den Baumbestand verdeckt (14 ha). Zum Teil werden die Straßen jedoch auch durch Straßenbegleitgrün verdeckt. Für weite Strecken ist der den Wesel-Datteln-Kanal begleitende asphaltierte Weg nördlich des Kanals ebenfalls als vegetationsverdeckt klassifiziert worden. Hierfür sind ebenfalls die Paßungenauigkeiten der Maske verantwortlich (vgl. Kap. 6).

### (4) Kategorie „Grünland“

Diese Kategorie ist die erste der nun folgenden Kategorien, in denen nach Vitalitätsstufen unterschieden wird. Die Flächen für Grünlandnutzung sind vor allem im Nordwesten und Nordosten des Mosaiks konzentriert; einige verstreut liegende Parzellen finden sich noch im Osten/Südosten des Bildausschnitts (vgl. Karte A.1, Anhang A). Von den 70 ha klassifizierbarer Fläche werden 69 ha klassifiziert. Der überwiegende Teil der Flächen (46 ha) ist vegetationsbestandene, wobei die Klasse „Grünland: vital 0,5-<0,6“ die höchste klassifizierbare Vitalitätsstufe anzeigt. Die darüber hinaus gehenden Vitalitätsklassen sind für Flächengrößen von unter 1 ha Flächengröße nicht mehr dokumentiert (s.o.). Gleiches gilt für wasserbedeckte Bereiche. Im Nordwesten liegt ein kleiner Tümpel von unter 1 ha Größe (vgl. Abb. 5.19).

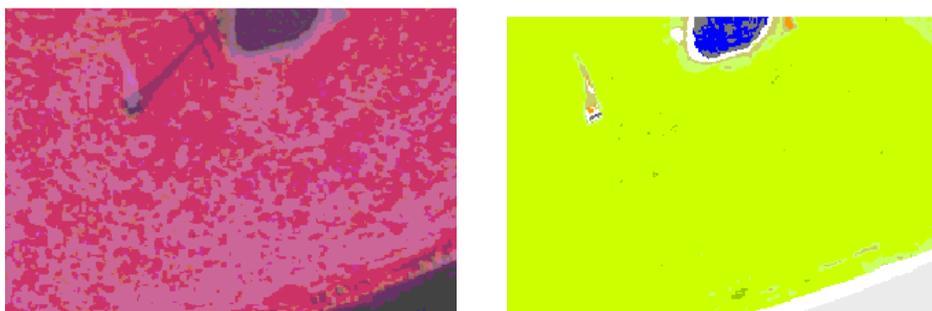


Abb. 5.19: Wasserfläche unter 1 ha Ausdehnung in der Kategorie „Grünland“, rechts im klassifizierten Bild großteils blau eingefärbt (screenshots).

Mit 1 ha sind verschwindend geringe Flächenanteile als verschattete Bereiche klassifiziert worden. Kahle Flächen umfassen 5 ha, während Bereiche, die den Übergang von nicht vitaler Vegetation zu vitaler Vegetation anzeigen, 7 ha der Gesamtfläche beanspruchen (vgl. Abb. 5.20). Allerdings dürfte diese Nutzungskategorie keine kahlen Flächen aufweisen, da Grünland in der Regel durch Mast- bzw. Milchvieh beweidet wird oder der Heuherstellung für die Winterfütterung dient. Sehr wahrscheinlich handelt es sich bei den kahlen Flächen um Grünland, das in Ackerland umgewandelt wurde. Da diese Entwicklung in der Satellitenbildszene vom 01.05.1986 sehr deutlich abzulesen ist, wird das Phänomen dort detaillierter erläutert (vgl. Kap. 5.1.3.3).

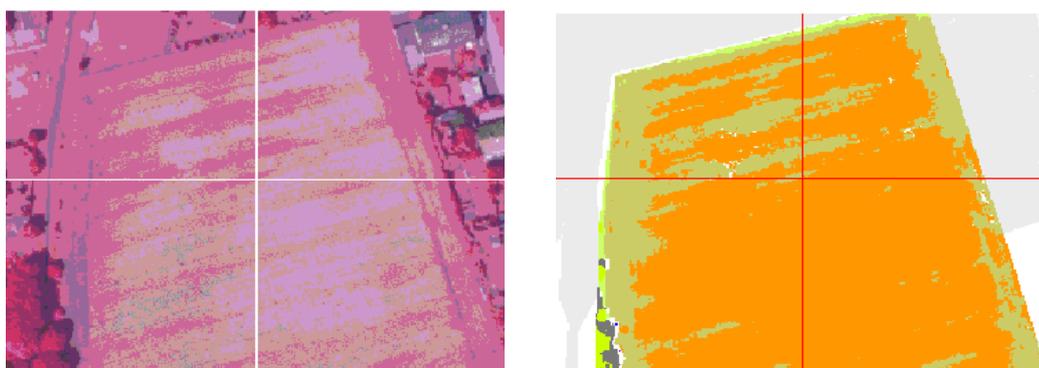


Abb. 5.20: Übergang von nicht vitalen zu vitalen Flächen (olivgrün, rechts im klassifizierten Bild) in direkter Nachbarschaft zu Bereichen, die als kahler Boden klassifiziert wurden (orange eingefärbte Flächen). Das Fadenkreuz dient zur besseren Orientierung (screenshots).

#### (5) Kategorie „Ackerflächen“

Die Ackerflächen konzentrieren sich auf ein großes Areal südlich von Hamm, südwestlich von Flaesheim sowie eine Fläche im Lippebogen im Nordosten des Mosaiks in direkter Nachbarschaft zu den Filterbecken (vgl. Karten A.1, Anhang A). Aufgrund der Nutzungsstrukturen der Ackerflächen sind die Unterklassen sehr stark durchmischt. Vorherrschend sind auch hier die vegetationsbestandenen Areale mit 93 von insgesamt 134 ha klassifizierter Fläche (136 ha klassifizierbar). Die höchste Vitalitätsstufe wird mit dem NDVI-Wert  $<0,7$  erreicht. Nur bis zu diesem Wert kann in der Hektarauflösung Vitalität erfaßt werden. Mit 29 ha weisen Teile der Ackerflächen kahlen Untergrund auf. Bereiche, die den Übergang von nicht vitaler Vegetation zu vitaler Vegetation anzeigen, belegen 20 ha der klassifizierbaren Flächen. Häufig sind dies Äcker, auf denen Kulturpflanzen wie Mais oder Winterweizen auflaufen bzw. das Ähren- und Rispschieben beginnt. Mit 2 ha werden verhältnismäßig kleine Flächen als verschattet ausgewiesen; sie liegen in der Regel an Nutzungsgrenzen (vgl. Abb. 5.21).

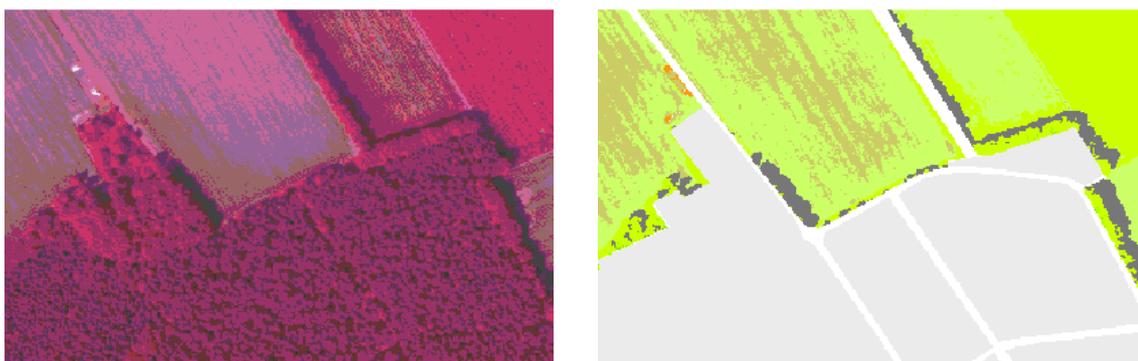


Abb. 5.21: Unterklasse „verschattete Bereiche“ der Kategorie „Ackerflächen“, die für diese Szene vor allem durch Baumbestand hervorgerufen werden (dunkelgraue Flächen im klassifizierten Bild rechts; screenshots).

#### (6) Kategorie „Nadelwald“

Die Nadelwaldflächen liegen großzügig und mit 194 ha klassifizierbarer Fläche recht geschlossen großflächig im Bildzentrum verteilt. Mit 2 bzw. 9 ha ist der Anteil kahler Bereiche und Flächen, die den Übergang nicht vitaler zu vitalen Flächen anzeigen, recht klein. Relativ groß hingegen ist der Anteil verschatteter Areale, die 23 ha abdecken. Zum einen ergibt sich dies durch den Baumbestand, der stark besonnte und folglich auch verschattete Zonen durch den Schattenwurf der Bäume und der Baumkronen aufweist. Dies verstärkt sich, sobald die Bestände recht locker sind. Allerdings werden vor allem auch im südöstlichen Teil des Bildausschnitts Nadelwaldflächen fälschlicherweise als verschattete Areale klassifiziert; dies wird in Kapitel 6 diskutiert. Aufgrund der spektralen Bildeigenschaften können hier nur Vitalitätsstufen unterschieden werden (NDVI-Werte von 0,5 bis  $\geq 0,9$  in Intervallen von 0,1). Darüber hinaus ist eine Trennung in laubwald- und nadelwald-dominierte Bereiche nicht möglich. Mit 157 ha decken vegetationsbestandene, vitale Flächen den Großteil der klassifizierbaren Fläche ab. Die Grenze der Vitalitätsstufen liegt hier bei einem NDVI-Wert  $< 0,7$ . Weitere Flächen mit höherer Vitalität bei mindestens 1 ha Flächen-summe werden nicht angezeigt. Insgesamt weist die Mehrzahl der Bäume NDVI-Werte zwischen 0,3 bis  $< 0,4$  auf (85 ha).

#### (7) Kategorie „Laubwald“

Laubwaldflächen nehmen 57 ha klassifizierte von insgesamt 58 ha klassifizierbarer Fläche ein. Sie umfassen damit nur ca. ein Viertel der klassifizierten Nadelwaldflächen. 53 ha davon werden als vegetationsverdeckt in den Vitalitätsstufen 0,3 bis  $< 0,7$  ausgewiesen. Auch hier werden keine höheren Vitalitätsstufen angezeigt. Kahle Bereiche belegen 1 ha. Ein Beispiel für diese Unterklasse liegt im äußersten Südwesten des Bildausschnitts. Diese Teilfläche scheint durch Umwandlung eines breiten Streifens ehemaligen Laubwaldes in Ackerflächen entstanden zu sein (vgl. Abb. 5.22). Verschattete Areale sowie Übergänge von nicht vitalen zu vitalen Bereichen decken mit 3 bzw. 1 ha nur kleine Flächen ab.

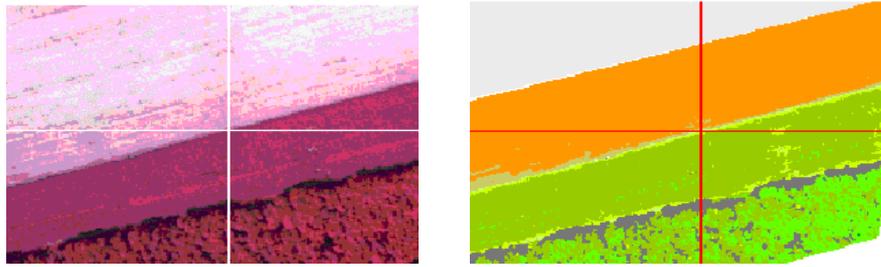


Abb. 5.22: Umnutzung von Laubwaldflächen in Ackerland: z.T. liegt kahler Untergrund vor (orange eingefärbt im klassifizierten Bild rechts), z.T. ist die ehemalige Waldfläche bestellt (verschiedene Grüntöne). An der Landnutzungsgrenze zwischen Wald und Ackerfläche wird ein schmaler Saum als „verschattete Bereiche“ klassifiziert (dunkelgrau; hellgrau eingefärbte Fläche: nicht klassifiziert; das Fadenkreuz dient zur besseren Orientierung. screenshots).

#### (8) Synthesekarte der wissensbasierten Klassifikation

Die Synthesekarte faßt alle Einzelklassifikationen zusammen. Hierbei werden die Kategorien „Wasserflächen“ und „Straßenflächen“ gesondert ausgewiesen. Die Kategorien „Mischnutzung“, „Grünland“, „Ackerflächen“, „Nadelwald“ und „Laubwald“ sind kategorieübergreifend nach kahlen/ versiegelten Bereichen, verschatteten Arealen sowie vegetationsbestandenen Gebieten klassifiziert.

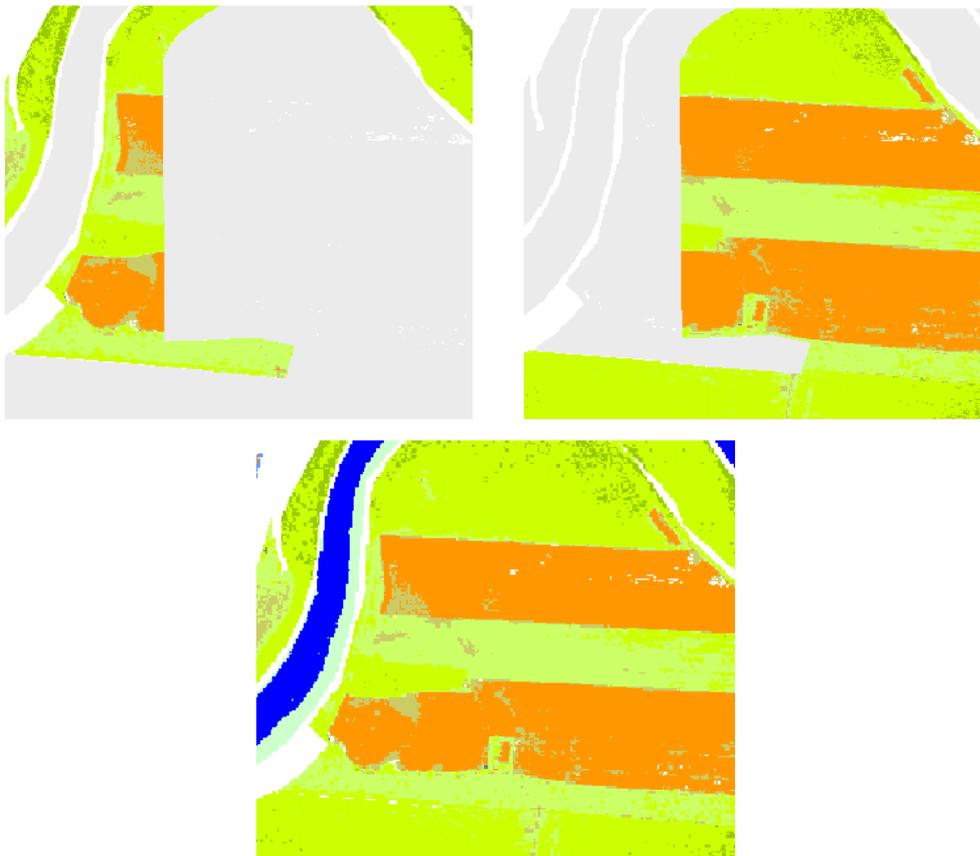


Abb. 5.23: Klassifikation der Grünlandflächen oben links, Klassifikation der Ackerflächen oben rechts; unten: die Synthese der Einzelklassifikation zeigt Zusammenhänge auf (screenshots).

Dabei sind Kategorien, die Vitalitätsstufen unterscheiden (Grünland, Ackerflächen, Nadel-, Laubwald) und Kategorien, die lediglich Vegetation anzeigen, zu unterscheiden. Diese Synopse ermöglicht es, über die einzelnen Bildsegmente hinaus räumliche Verteilungen von Landnutzungen bzw. -bedeckungen zu erkennen und Zusammenhänge aufzudecken (vgl. Abb. 5.23; siehe Beispiel Karte 5.4).

### 5.1.3.2 Wissensbasierte Klassifikation des Color-Luftbildmosaiks

Zum Vergleich mit der vorangehend vorgestellten Klassifikation des CIR-Luftbildmosaiks werden nachfolgend die Resultate der wissensbasierten Klassifikation des Color-Luftbildmosaiks erläutert; Besonderheiten werden diskutiert. Die verschatteten Bereiche werden im Klassifikator über zwei verschiedene Entscheidungsbäume isoliert, in der Darstellung jedoch zu einer Klasse zusammengefaßt.

#### (1) Kategorie „Mischnutzung“

Im Vergleich zum CIR-Luftbildmosaik können für dieses Mosaik nur 50 der maximal möglichen 56 ha klassifizierbarer Fläche klassifiziert werden. Der Anteil der verschatteten Flächen ist mit 7 ha gleich geblieben. Allerdings sind diese Flächen räumlich anders verteilt (vgl. Kap. 6). Trotz der Unsicherheiten durch die Unterklasse „verschattete Bereiche“ sowie die kleinere klassifizierte Gesamtfläche ist der Trend für das Color-Luftbildmosaik eindeutig: der klassifizierte Anteil versiegelter, bebauter und kahler Flächen ist mit 28 ha deutlich höher als im CIR-Luftbildmosaik, der erfaßte Anteil vegetationsverdeckter Areale ist dagegen mit 16 ha deutlich geringer (aufaddiert 34 ha 1985 zu 16 ha 1990, vgl. Tab. 5.8).

Tab. 5.8: Flächendifferenzen der Kategorie Mischnutzung: CIR- zu Color-Luftbildmosaik

Klassen	Flächendifferenz (ha)
Mischnutzung: Bebauung, kahler Boden, Versiegelung	+15
Mischnutzung: verschattete Bereiche	0
Mischnutzung: vegetationsverdeckt	-18
tatsächlich klassifizierte Fläche	-4

Ein möglicher Grund dafür dürfte die relativ frühe Jahreszeit für die Aufnahmen von 1990 sein (Anfang Mai zu Ende Juli für 1985). Die phänologischen Entwicklungsphasen der verschiedenen Laubbaumarten sind noch nicht sehr weit fortgeschritten, so daß sich z.B. das Straßenbegleitgrün eher durch Schattenwurf als durch Grünreflexion auszeichnet (vgl. Abb. 5.24). Allerdings kann auch eine tatsächliche Zunahme des Flächenanteils vorliegen.



Abb. 5.24: Straßenbegleitgrün und Schattenwurf auf Straßenflächen (gelb): hellgrüne und dunkelgraue Bereiche in der gelb markierten Straßenfläche (screenshot).

### (2) Kategorie „Wasserflächen“

Auch für diese Kategorie kann im Color-Luftbildmosaik nicht die gesamte klassifizierbare Fläche klassifiziert werden. Aufgrund der Spektralsignatur grüner vitaler Vegetation und der Wasserflächen kann zudem keine Differenzierung von vitaler Vegetation und von Wasserflächen vorgenommen werden, so daß in den Uferbereichen der beiden Fließgewässer Vegetation stellenweise falsch als Wasserfläche ausgewiesen wird (vgl. Kap. 6). Darüber hinaus werden keine versiegelten/kahlen Flächen isoliert; demnach wird die Kategorie nur über eine Klasse definiert. Die Abweichung von 10 ha im Vergleich zum Mosaik von 1985 ergibt sich zum Teil aus der Paßungengenauigkeit der Maske, die sich für beide Aufnahmezeitpunkte unterschiedlich auswirkt (vgl. Kap. 5.1.1.2). Tabelle 5.9 faßt die Unterschiede noch einmal zusammen.

Tab. 5.9: Flächendifferenzen der Kategorie Wasserflächen: CIR- zu Color-Luftbildmosaik

Klassen	Flächendifferenz (ha)
Wasserflächen	+10
tatsächlich klassifizierte Fläche	-2

### (3) Kategorie „Straßenflächen“

In dieser Kategorie werden für den besseren Vergleich mit dem Mosaik von 1985 die Unterklassen „Straßenflächen bzw. kahler Boden“ und „Straßenflächen: verschattet“ flächenmäßig zusammengefaßt (29 ha), auch wenn dies Unsicherheiten für die Flächen birgt, die verschattet sind (s.o. Kap. 4.2). Diese Klassen decken den Großteil der gesamten klassifizierten Fläche von 32 ha ab. Die klassifizierte Fläche ist deutlich größer als für das CIR-Luftbildmosaik. Auch hier kann die frühe Jahreszeit verantwortlich sein. Demgegenüber

werden nur 3 ha als vegetationsverdeckt ausgewiesen (vgl. Tab. 5.10). Für dieses Mosaik sind ebenfalls weite Strecken der Straßenflächen, die in Waldgebieten liegen, als vegetationsbestanden ausgewiesen; allerdings überwiegen für diese Areale Flächen der Unterklasse „verschattete Bereiche“.

Tab. 5.10: Flächendifferenzen der Kategorie Straßenflächen: CIR- zu Color-Luftbildmosaik

Klassen	Flächendifferenz (ha)
Straßenflächen (versiegelt und verschattet)	+8
Straßenflächen: vegetationsverdeckt	-11
tatsächlich klassifizierte Fläche	-3

#### (4) Kategorie „Grünland“

Diese Kategorie wird im Zuge der exemplarisch durchgeführten Veränderungsanalysen noch detaillierter vorgestellt (vgl. Kap. 5.1.4). Zunächst muß daran erinnert werden, daß Unterscheidungen nach Vitalitätsstufen für dieses Bildmosaik nicht möglich sind (vgl. Kap. 4.2). Aus diesem Grund werden für eine vergleichende Quantifizierung die Flächen der Klassen mit verschiedenen Vitalitätsstufen des Mosaiks von 1985 zu einer Klasse „Grünland: vegetationsbestanden“ aufaddiert; die Unterklasse „Übergang nicht vital-vital“ wird ebenfalls dazu gerechnet. Entsprechend den Jahreszeiten zu den jeweiligen Aufnahmezeitpunkten liegt der Flächenanteil für klassifizierte vegetationsbestandene Flächen 1985 höher als im Vergleich zum Mosaik vom Mai 1990. Folglich belegt die Unterklasse „versiegelte/kahle Flächen“ für 1985 eine kleinere Fläche als für 1990 (vgl. Tab. 5.11). Verschattete Bereiche decken für beide Aufnahmezeitpunkte je 1 ha Fläche ab; die räumliche Verteilung ist jedoch unterschiedlich (vgl. Kap. 6). Wie bereits für das CIR-Luftbildmosaik ausgeführt wurde, sind kahle Flächen untypisch für diese Kategorie. Hintergrund dürfte auch hier die Umwandlung von Grünland- in Ackerflächen sein (vgl. dazu die Ausführungen unter 5.1.3.3 zu der TM-Szene vom 01.05.1986).

Tab. 5.11: Flächendifferenzen der Kategorie Grünland: CIR- zu Color-Luftbildmosaik

Klassen	Flächendifferenz (ha)
Grünland: kahler Untergrund bzw. versiegelt	+12
Grünland: verschattet oder wenig vital	0
Grünland: vegetationsbestanden	-13
tatsächlich klassifizierte Fläche	0

#### (5) Kategorie „Ackerflächen“

Ein ähnlicher Trend wie für die Kategorie „Grünland“ ist auch für diese Kategorie festzustellen. Der erfaßte Anteil der kahlen/versiegelten Flächen liegt für 1990 deutlich höher als für 1985. Für eine vergleichende Quantifizierung werden die Unterklassen dieser Kategorie für die Klassifizierung des CIR-Luftbildmosaiks wie zuvor für die Kategorie „Grünland“

zusammengefaßt. Der klassifizierte Flächenanteil für vegetationsverdeckte Areale ist für 1990 um 30 ha kleiner als für 1985. Ein Grund für diese beiden Abweichungen müßte ein sehr unterschiedlicher Fruchtfolgewechsel und folglich stark abweichende phänologische Stadien auf einzelnen Ackerparzellen sein. Das bedeutet, daß die angezeigten Zu- oder Abnahmen der Flächensummen vordringlich durch phänologische Entwicklungsstadien und nicht durch tatsächliche Veränderungen bedingt sind (s.o.).

Für 1990 wird ein etwas größerers Areal als verschattete Bereiche ausgewiesen als für 1985. Ursache hierfür können Fehlklassifizierungen sehr vitaler, dunkelgrün reflektierender Ackerflächen im Südosten des Bildausschnitts sein; sie werden aufgrund ihres Spektralverhaltens fälschlicherweise als verschattete Flächen klassifiziert (vgl. Kap. 6). Tabelle 5.12 legt die Zu- oder Abnahmen der Flächen offen.

Tab. 5.12: Flächendifferenzen der Kategorie Ackerflächen: CIR- zu Color-Luftbildmosaik

Klassen	Flächendifferenz (ha)
Ackerflächen: kahler Untergrund bzw. versiegelt	+28
Ackerflächen: verschattet, wenig vital	+1
Ackerflächen: bestellt	-30
tatsächlich klassifizierte Fläche	-1

#### (6) Kategorie „Nadelwald“

Diese Kategorie ist nicht nur Bestandteil der wissensbasierten Einzelbildklassifikation. Sie wird zusätzlich einer exemplarisch durchgeführten Veränderungsanalyse unterzogen. Für vergleichende Analysen müssen für das Mosaik von 1990 zum einen die Flächen der Klassen „Nadelwald: grün reflektierend“ und „Nadelwald: dunkelgrün reflektierend“ zusammengefaßt werden. Zum anderen müssen für das CIR-Luftbildmosaik die verschiedenen Unterklassen, die nach Vitalitätsstufen ausgeschieden werden, sowie die Klasse „Übergang nicht vital-vital“ zusammengefaßt werden. Dann erst ist eine Untersuchung der Zu- oder Abnahme der Waldflächen möglich. Diese Untersuchung muß aber wegen der verschiedenen Spektraleigenschaften der Luftbilder von 1985 und 1990 leider recht allgemein bleiben, da die Bilder für weitere, detailliertere Vergleichsanalysen nicht kompatibel sind (s.o. Kap. 3.1, 4.2). Eklatante Abweichungen der Flächengrößen zwischen beiden Mosaiken treten für die Nadelwaldflächen nicht auf. Die als verschattet bzw. wenig vital klassifizierten Flächen sind für das Mosaik von 1990 jedoch um 8 ha größer als für den Bildausschnitt von 1985. Dies kann zum Teil mit Fehlklassifizierungen von Nadelwaldflächen als „verschattet bzw. wenig vital“ zusammenhängen (vgl. Kap. 6). Allerdings kann dieser klassifizierte Flächenanteil auch auf realen Zuwachs hindeuten. Da jedoch auch für diese Klasse die unterschiedlichen phänologischen Stadien die Ergebnisse der einzelnen Klassifikationen dominieren, sagt die reine Quantifizierung wenig aus. Tabelle 5.13 gibt Aufschluß über die einzelnen Veränderungszahlen.

Tab. 5.13: Flächendifferenzen der Kategorie Nadelwald: CIR- zu Color-Luftbildmosaik

Klassen	Flächendifferenz (ha)
Nadelwald: kahler Untergrund bzw. versiegelt, Holzanteil	+19
Nadelwald: verschattete, wenig vitale Bereiche	+8
Nadelwald: Vegetation	-33
tatsächlich klassifizierte Fläche	0

Für die Klassifizierungen der nadelwalddominierten Flächen können die Bereiche, in denen der Waldboden, Rodungsflächen oder der Holzanteil in der Reflexion gegenüber der Grünreflexion überwiegt, sehr gut von den weiteren Unterklassen differenziert werden. Gebiete, in denen der Bestand recht locker ist, werden zudem deutlich sichtbar (vgl. Abb. 5.25).

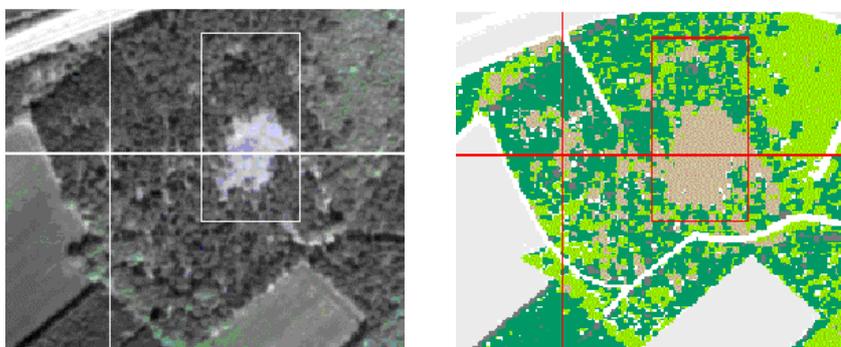


Abb. 5.25: Durchscheinender Boden, Holzanteil oder Rodungsflächen: links im Luftbildmosaik (hellere „Flecken“/Felder), rechts im klassifizierten Bild hellbraun eingefärbt; Fadenkreuz und Suchbox heben einige Flächen exemplarisch hervor (screenshots).

#### (7) Kategorie „Laubwald“

Ähnlich wie bei der Kategorie „Nadelwald“ verhält es sich bei der Kategorie „Laubwald“. Auch hier ist der Anteil durchscheinenden Bodens bzw. der Reflexionsanteil von Baumholz sehr gut zu isolieren. Der Flächenanteil beträgt 8 ha. Mögliche Gründe für diesen relativ hohen Flächenanteil können einerseits die frühe Jahreszeit respektive die frühe phänologische Phase sein. Andererseits kann dies auch durch den Alters- oder Gesundheitszustand der Wälder hervorgerufen werden. Eine weitere mögliche Ursache stellt die Umwandlung einer Teilfläche der Bildsegmentation für die Kategorie Laubwald dar (vgl. Abb. 5.22). Hier ist bereits rein visuell erkennbar, daß die Fläche nicht (mehr) mit Laubwald bestanden ist. Da sie als „kahler Boden“ klassifiziert wird, ist vielmehr davon auszugehen, daß sie z.B. als Ackerfläche genutzt wird und zum Aufnahmezeitpunkt unbestellt war.

Für diese Kategorie werden außerdem kleinere Nadelwaldflächen, die in laubwald-dominierten Bereichen liegen, zum Teil der Unterklasse „verschattete Flächen“ zugeordnet (vgl. Abb. 5.26). Darüber hinaus können Parzellen, die grün reflektieren, von Parzellen, die dunkelgrün reflektieren, in Abhängigkeit von der Bestandsdichte unterschieden werden. Je

dichter der Bestand, desto besser können die einzelnen Baumtypen voneinander getrennt werden (vgl. Abb. 5.15). Tabelle 5.14 zeigt die Veränderungen der Flächenanteile der einzelnen Unterklassen auf.

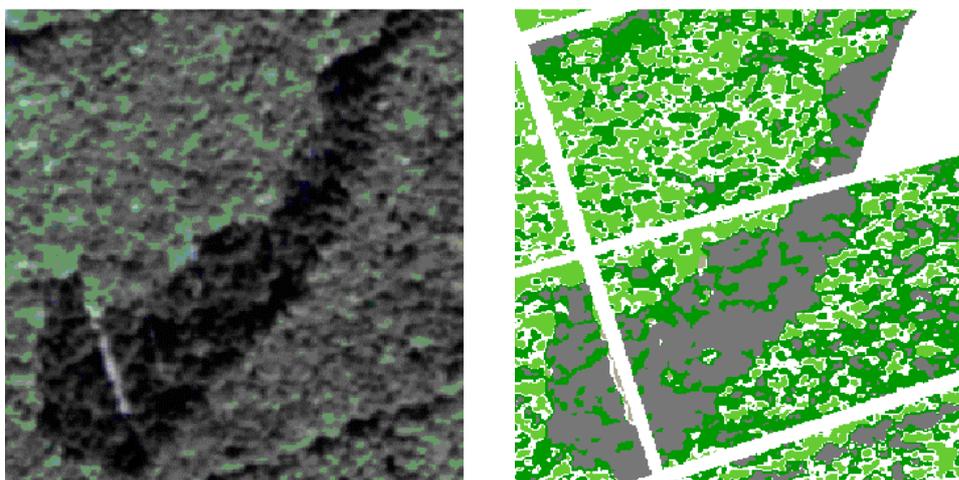


Abb. 5.26: Nadelwaldfläche, die fälschlicherweise großflächig der Unterklasse „verschattet“ zugeordnet wird. Im Luftbild links: kräftig dunkelgrün eingefärbte Fläche, im klassifizierten Bild rechts dunkelgrau gefärbt (weiße Bereiche: nicht klassifiziert; screenshots).

Tab. 5.14: Flächendifferenzen der Kategorie Laubwald: CIR- zu Color-Luftbildmosaik

Klassen	Flächendifferenz (ha)
Laubwald: kahler Untergrund bzw. versiegelt, Holzanteil	+7
Laubwald: verschattete, wenig vitale Bereiche	+3
Laubwald: Vegetation	-15
tatsächlich klassifizierte Fläche	-5

#### (8) Synthesekarte der wissensbasierten Klassifikation

Diese Karte zeigt die Zusammenfassung der einzelnen Klassifikationen. Unterschieden werden in dieser Gesamtdarstellung die Kategorien „Gewässer“, „Grünland“ und die Klassen „Straßenflächen bzw. kahler Boden“, „Ackerland: bestellt“, „Wald“ mit den verschiedenen Grünreflexionen und „Wald: durchscheinender Boden, Holzanteil“ sowie „vegetationsverdeckte Flächen“ und „Flächen: bebaut, versiegelt oder kahler Boden“. Die genannten Klassen werden klassenübergreifend dargestellt, so daß Kategorie- und Klassengrenzen nicht mehr überall sichtbar sind (vgl. Abb. 5.27). Das heißt, daß die Grenzen zwischen laub- und nadelwalddominierten Bereichen aufgrund der identischen Unterklassen nicht mehr sichtbar sind. Gleiches gilt z.B. für die Unterklassen „kahler Boden bzw. versiegelt“ aller Kategorien. Sie werden zu der Klasse „Flächen: bebaut, versiegelt oder kahler Boden“ zusammengefaßt. Dadurch werden Raummuster sichtbar; zugleich ermöglicht die Synopse, Erklärungsansätze für aufgedeckte Zusammenhänge zu entwickeln.

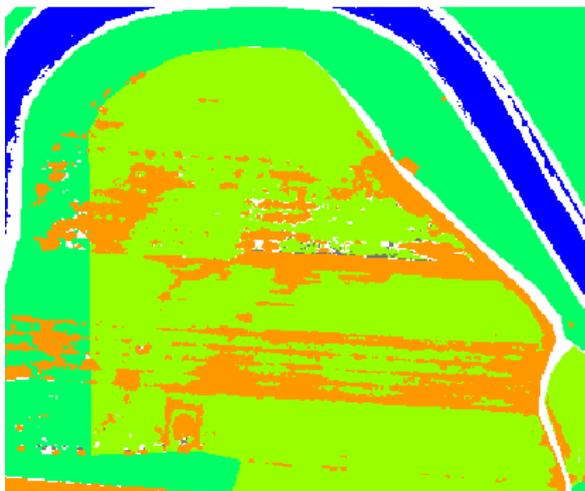


Abb. 5.27: Klassenübergreifende Darstellung kahler Flächen (orange) sowie Unterscheidung der Kategorien „Grünland“ (dunkelgrün) und „Ackerland“ (hellgrün), jeweils vegetationsbestanden (screenshot).

### 5.1.3.3 Wissensbasierte Klassifikation der Landsat TM-Datensätze sowie des Landsat - MSS-Datensatzes

Im Mittelpunkt der folgenden Erläuterungen stehen die Ergebnisse der Klassifizierungen der TM-Datensätze; die kommentierten Ergebnisse orientieren sich in ihren vergleichenden Analysen dabei stets am Datensatz vom 01.05.1986. Die Resultate werden dabei nicht datensatzorientiert, sondern kategorieweise vorgestellt und erläutert (vgl. Beispiele: Karten 5.1 bis 5.4). Der MSS-Datensatz wird je Kategorie kurz vergleichend zu dem TM-Datensatz vom gleichen Datum vorgestellt (02.07.1991). Dieser Landsat TM-Datensatz wird dabei als Referenzdatensatz angesehen, so daß vergleichende, wertende Aussagen über den MSS-Datensatz stets daran gemessen werden. Die Klassifizierungen der Landsat MSS-Daten weichen in der Flächenausweisung von Klassen zum Teil erheblich von den diagnostizierten Flächenausdehnungen in der TM-Szene ab. Die möglichen Gründe für diese Abweichungen sind vielfältig; die wichtigsten seien hier genannt:

- unterschiedliche Sensoreigenschaften (Radiometrie, Spektralkanäle),
- unterschiedliches geometrisches Auflösungsvermögen der Rohdaten,
- veränderte Grauwerte durch das Geocodieren.

Dabei sind für die Klassifikationsergebnisse der TM-Datensätze folgende Aspekte zu beachten:

- Mit fortschreitenden phänologischen Phasen wird über die Klassifikationsansätze zunehmend mehr vitale Vegetation durch das wechselnde Spektralverhalten von anderen Objektgruppen isolierbar, erfaßt und klassifiziert. Entsprechend verschieben sich die Flächenanteile in den Unterklassen (vgl. Kap. 5.1.2), so daß die Quantifizierungen auf einen vermeintlich stattgefundenen Flächenzuwachs hindeuten (Tab. 5.15 bis 5.29).

Allerdings nimmt der Flächenanteil der Vegetation nicht wirklich in dem Umfang zu. Ursächlich für diesen vermeintlichen Trend ist das sich ändernde Spektralverhalten der Vegetation im Laufe der phänologischen Phasen. Damit wird die Vegetation von anderen Objekten/Klassen spektral besser trennbar und ansprechbar.

- Zudem ist der klassifizierbare Grad der Vitalität auch abhängig von der Phänologie. Daher ist es nicht verwunderlich, daß in der Szene vom 02.07.1991 deutlich häufiger höhere Vitalität klassifiziert wird, als in den Frühsommer-Szenen vom Mai 1986.
- Nur die Kategorien „Schleusenbauwerke“ und „Fläche: unbestimmbar bzw. vegetationslos“ zeigen gegensätzliche Entwicklungen. Hier nimmt der Grad der Vegetationsbedeckung mit fortschreitender Jahreszeit ab (s.u.).

### (1) Kategorie „Gewässer“

Die Klassifikationen der Kategorie „Gewässer“ wird im folgenden Kapitel einer aufbauenden Veränderungsanalyse unterzogen. Als Gewässer treten vor allem die Lippe, der Wesel-Datteln-Kanal, der Halterner Stausee im Norden des Bildausschnitts sowie Teile des Hullerner Stausees im Nordosten hervor. Im Südosten von Flaesheim liegt zudem ein Baggersee, der ebenfalls über die Maske „Gewässer“ erfaßt ist (vgl. Karte A.1, Anhang A).

Für die Szene vom 01.05.1986 wird mit 258 ha der insgesamt 284 ha klassifizierten Fläche (klassifizierbar: 290 ha) erwartungsgemäß der Großteil der Fläche als Wasserflächen klassifiziert. Nur 13 ha werden als kahle Flächen/Sandflächen diagnostiziert. Diese Flächen konzentrieren sich auf die Uferzone des Baggersees im Osten der Szene. Nach Süden an die Sandflächen angrenzend wird ein schmaler Streifen Vegetation (laut Abgleich mit der Multi-spektralszene: Nadelwald) fälschlicherweise als Wasserfläche ausgewiesen. Diese Fehlklassifizierung wird in der Fehlerdiskussion behandelt. Als vegetationsverdeckt werden weite Strecken der Lippe eingestuft (12 ha, vgl. Abb. 5.28; Fehlerdiskussion Kap. 6).

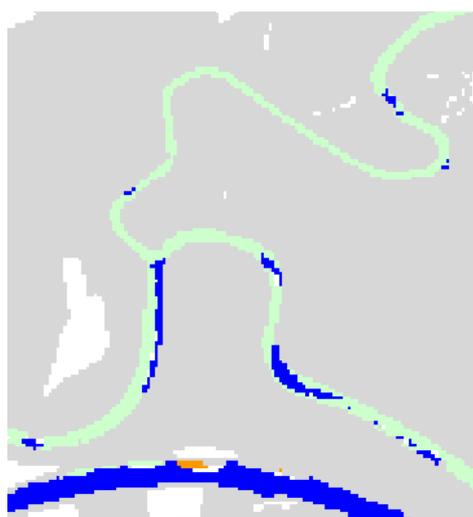


Abb. 5.28: Lippeverlauf, Klassifikation der Landsat-TM-Szene vom 02.07.1991: weite Strecken werden als vegetationsverdeckt (hellgrün gefärbt) ausgewiesen, Wasserflächen sind blau, kahle bzw. versiegelte Flächen sind orange eingefärbt (screenshot).

Für die Klassifizierung des Satellitenbildausschnitts vom 17.05.1986 nimmt der Anteil der klassifizierten Wasserflächen an der insgesamt klassifizierten Fläche von 281 ha ab. Zugleich wird eine deutlich größere Fläche als vegetationsverdeckt ausgewiesen (31 ha; vgl. Tab. 5.15). Auch hier rufen offenbar die unterschiedlichen phänologischen Stadien die Differenzen in den Flächensummen hervor (vgl. oben).

Entsprechend der jahreszeitlich bedingten Entwicklung der Vegetation wird für die TM-Szene vom 02.07.1991 nochmal mehr Fläche als vegetationsverdeckt klassifiziert. Die Vegetation läßt sich durch ihr phänologisch bedingtes Reflexionsverhalten zu dem Zeitpunkt von den anderen Objekten/Klassen eindeutig trennen und als eigene Klasse „richtig“ klassifizieren.

Zeitgleich - aber davon unabhängig - ist die klassifizierte Flächenausdehnung der Sandbereiche deutlich gegenüber dem vorherigen Aufnahmedatum zurückgegangen. Die Wasserfläche hat sich in der Umgebung des Baggersees tatsächlich weiter ausgedehnt. Hier zeigt sich das Ergebnis fünf Jahre dauernder Erosion oder weiterer Abgrabungen von Sanden; auch die Vegetationsgrenze ist insgesamt weiter zurückverlagert worden (vgl. Abb. 5.29).

Die Klassifizierung der MSS-Szene deckt im Vergleich zu der der Landsat-TM-Szene eine größere Fläche ab. Zugleich werden Gewässer für eine kleinere Fläche und Vegetation für eine sehr viel größere Fläche klassifiziert, wobei keine eklatanten Abweichungen zu erkennen sind.

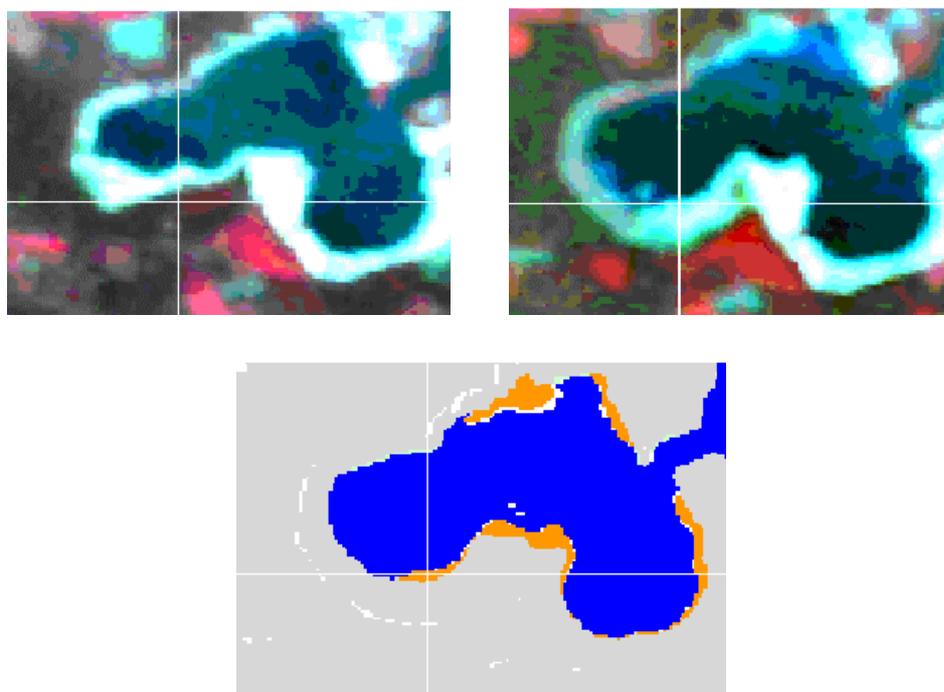


Abb. 5.29: Landsat TM-Szene vom 17.05.1986 oben links, daneben die Szene vom 02.07.1991 rechts sowie die Klassifizierung der Szene vom 02.07.1991 darunter: Wasserflächen sind blau, Sandflächen orange eingefärbt. Die Uferlinie ist im Verlauf von 5 Jahren zurückgedrängt worden (das Fadenkreuz dient zur Orientierung; screenshots).

Tab. 5.15: Flächendifferenzen der Kategorie Gewässer: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Gewässer	-17	-16
Gewässer: Sandflächen bzw. kahler Boden	-3	-7
Gewässer: vegetationsverdeckt	+19	+19
tatsächlich klassifizierte Fläche	-3	+1

## (2) Kategorie „Wohnbauflächen“

Die Flächen dieses Bildsegments umfassen Hamm im Westen des Bildausschnitts, östlich davon Bossendorf sowie im Osten Flaesheim. Dazu gehören außerdem südliche Stadtteile der Stadt Haltern im Nordwesten der Szene (vgl. Karten A.1, Anhang).

Für die Aufnahme vom 01.05.1986 wird eine sehr große Fläche für die Unterklasse „versiegelte/kahle Bereiche“ ausgewiesen. Das Straßenbegleitgrün, öffentliche Grünanlagen sowie die Vegetation in den Vorgärten und Gärten in direkter Nachbarschaft zur Wohnbebauung sind noch wenig entwickelt; die versiegelten bzw. kahlen Flächen scheinen durch. Nur 35 ha der insgesamt 224 ha klassifizierten Fläche werden zu diesem Zeitpunkt als vegetationsverdeckt klassifiziert. Für die Szenen vom 17.05.1986 und 02.07.1991 wird jeweils eine Fläche von 104 ha der Klasse „Wohnbauflächen: vegetationsverdeckt“ zugewiesen. Ursache dieses (vermeintlichen) Flächenzuwachses dürften auch hier wieder vor allem die fortgeschrittenen phänologischen Stadien bei diesen Aufnahmen im Vergleich zur Szene vom 01.05.1986 sein. Die erfaßten Flächenanteile der Unterklasse „versiegelte/kahle Areale“ bleiben für die beiden letztgenannten Daten gleich. Der Unterschied von 1 ha liegt innerhalb der tolerierbaren Abweichungen aufgrund der veränderten Grauwerte infolge von Atmosphärenkorrektur und Geocodierung (vgl. Tab. 5.16, vgl. Kap. 6).

Tab. 5.16: Flächendifferenzen der Kategorie Wohnbauflächen: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Wohnbaufläche: versiegelt bzw. kahler Boden	-70	+1
Wohnbaufläche: vegetationsverdeckt	+69	0

Auch für die Landsat MSS-Szene wird die klassifizierbare Fläche vollständig klassifiziert. Die Klassifizierung ergibt jedoch gegensätzliche Tendenzen der beiden Unterklassen für diese Kategorie: versiegelte Bereiche werden vergleichsweise unterschätzt, während vegetationsverdeckte Areale in der Flächenausdehnung überschätzt werden. Allerdings zeigt die räumliche Verteilung der einzelnen Bereiche keine eklatanten Abweichungen zum Landsat TM-Bild vom gleichen Datum, so daß der Trend der MSS-Klassifizierung durchaus richtig - wenn auch ungenauer - ist.

### (3) Kategorie „Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen“

Diese Kategorie faßt viele verschiedene Nutzungsarten zusammen. Dadurch, daß auch die Filterbecken der Wasseraufbereitungsanlage im Süden des Halterner Stausees Bestandteil dieser Kategorie sind, muß neben den üblichen Unterscheidungen in „vegetationsverdeckt“ und „vegetationslos“ zusätzlich die Unterklasse „Wasserflächen“ isoliert werden. Dies ist für weite Teile der Filterbecken recht schwierig, da die Filterbecken großflächig mit Wasserpflanzen bedeckt sind. Folglich kommt es zumeist zu einer Unterschätzung der Ausdehnung der Wasserflächen (vgl. Abb. 5.30, 5.31).

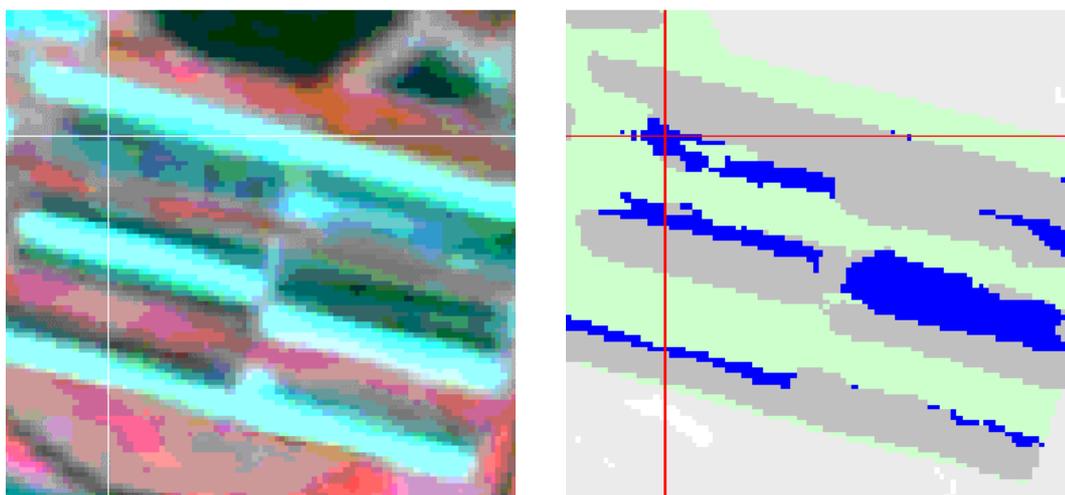


Abb. 5.30: TM-Szene vom 02.07.1991: Klassifizierung der Filterbecken rechts, wobei Teile als vegetationsverdeckt ausgewiesen werden (s. Umfeld des Fadenkreuzes: grün gefärbt), während die restlichen Flächen der Bildsegmentierung als Wasserflächen klassifiziert werden (blau; screenshots).

Abbildung 5.31 verdeutlicht diesen Umstand. Im CIR-Luftbildmosaik sind die Filterbecken ebenfalls zum Teil mit Wasserpflanzen verdeckt bzw. durchsetzt. Wegen der höheren Bodenauflösung kann man dieses Phänomen hier besser betrachten.

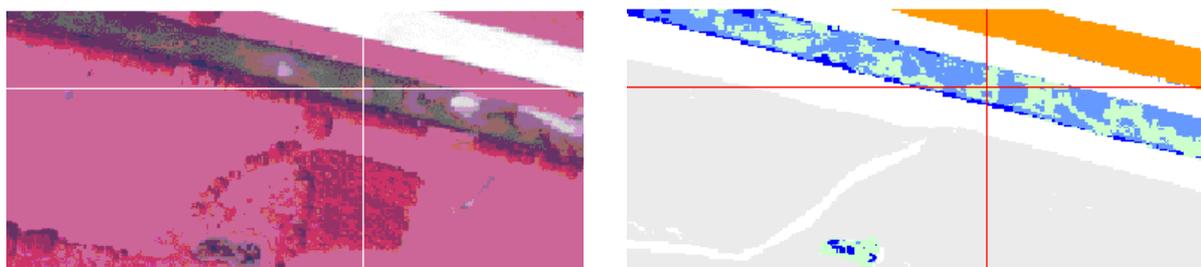


Abb. 5.31: CIR-Luftbildmosaik: Klassifizierung der Kategorie „Wasserflächen“, die in vier Unterklassen unterteilt ist. Weite Teile der Filterbecken sind als vegetationsverdeckt ausgewiesen und in dem klassifizierten Bild rechts grün gefärbt (das Fadenkreuz dient zur Orientierung; screenshots).

Der klassifizierte Flächenanteil der Industrie-, Gewerbe- und Sonderflächen ist für das Datum 01.05.1986 mit 263 ha der größte; dies gilt auch für die Unterklasse „Wasserflächen“ mit 14 ha. Für die Unterklasse „vegetationsverdeckt“ kann eine Fläche von 20 ha isoliert werden. Der Anteil der als „vegetationsverdeckt“ klassifizierten Bereiche liegt mit 61 ha bzw. 94 ha für die weiteren TM-Szenen deutlich höher (Stichwort: Phänologie). Die als Wasserflächen ausgewiesenen Bereiche bewegen sich zwischen 11 und 14 ha; die möglichen Gründe dafür sind weiter oben bereits ausgeführt worden. Tabelle 5.17 führt die Veränderungszahlen im einzelnen auf.

Tab. 5.17: Flächendifferenzen der Kategorie Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen: versiegelt etc.	-38	-35
Industrieflächen etc.: Wasserflächen	-3	+2
Industrieflächen etc.: vegetationsverdeckt	+41	+33
tatsächlich klassifizierte Fläche	0	0

Die MSS-Szene zeigt im Vergleich zur TM-Szene des gleichen Datums deutlich abweichende Flächenwerte für die erfaßten versiegelten Industrieflächen und vegetationsverdeckten Areale. Dabei ist die Flächensumme für klassifizierte versiegelte Bereiche sehr viel höher (um 49 ha) und die Summe der erfaßten vegetationsverdeckten Bereiche entsprechend um 49 ha geringer. Streckenweise werden Bereiche des Südufers des Halterner Stausees als Wasserflächen klassifiziert, obwohl diese Flächen laut Abgleich mit der TM-Szene eindeutig keine Wasserflächen sind (vgl. Kap. 6).

#### (4) Kategorie „Schleusenbauwerke“

Diese Kategorie könnte aufgrund ihrer geringen Flächenausdehnung vernachlässigt werden. Da sie jedoch im Kanal (östlich von Flaesheim) relativ großflächig abweichendes Reflexionsverhalten im Vergleich zu den Wasserflächen aufweist, empfiehlt sich eine genaue Abgrenzung über die Bildsegmentation. Diese Fläche allein auf Basis des Spektralverhaltens isolieren zu wollen, würde zu sehr viel unschärferen Ergebnissen führen, die sich zudem nicht sicher quantifizieren ließen. Die Fläche wird durch den Klassifikationsansatz für alle Satellitenbildszenen vollständig erfaßt; in der MSS-Szene kommt es zu einer Unterschätzung der versiegelten/kahlen Flächen zugunsten der vegetationsverdeckten Areale.

Die Variationen der Flächenausdehnungen vegetationsloser und vegetationsbestandener Bereiche bewegen sich durchaus in tolerierbaren Schwankungsbreiten, die durch die Atmosphärenkorrektur und die Geocodierung hervorgerufen werden. Allerdings werden sie vergleichend analysiert, da Untersuchungen der multispektralen Datensätze auf reale Veränderungen hindeuten. Die klassifizierte Fläche für die Unterklasse „vegetationsbestanden“

nimmt für 1991 im Vergleich zu den klassifizierten Flächen in den vorherigen Szenen deutlich ab. Dies kann durch Trockenschäden bedingt sein, die eventuell infolge der Mahd der Flächen auftraten. Ein weiterer möglicher Grund kann die zusätzliche Versiegelung dieser Flächen innerhalb der fünf Jahre sein (vgl. Tab. 5.18).

Tab. 5.18: Flächendifferenzen der Kategorie Schleusenbauwerke: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Schleusenbauwerke; versiegelte/kahle Flächen	-2	+1
Schleusenbauwerke: vegetationsverdeckt	+2	-1
tatsächlich klassifizierte Fläche	0	0

#### (5) Kategorie „Fläche: vegetationslos bzw. unbestimmbar“

Die Klassifizierungen dieser Kategorie bilden das komplementäre Gegenstück zu den Klassifikationen der Kategorie „Gewässer“ im Bereich des Baggersees. Der erfaßte Flächenanteil der Vegetation geht im Laufe der Jahre zurück, der Anteil der über die Klassifizierungen erfaßten vegetationslosen Areale nimmt zu (vgl. Abb. 5.29 und Abb. 5.32). Tabelle 5.19 dokumentiert die Entwicklungen.

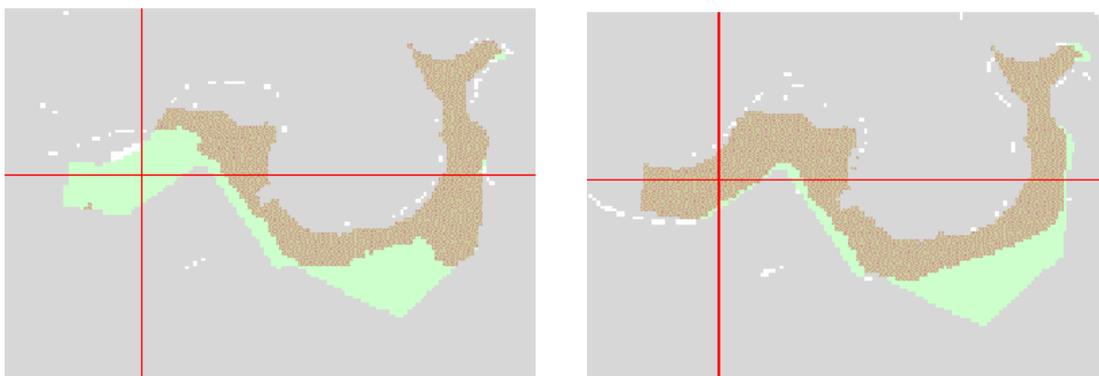


Abb. 5.32: Abnahme der Vegetation im Ufersaum eines Baggersees: 17.05.1986 (links) zu 02.07.1991 (rechts). Vegetation ist grün, vegetationslose Flächen sind braun gefärbt (vgl. Fadenkreuz zur Orientierung; screenshots).

Tab. 5.19: Flächendifferenzen der Kategorie Fläche: vegetationslos bzw. unbestimmbar: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Fläche: vegetationslos bzw. unbestimmbar	-1	+4
Fläche: unbestimmbar etc.: Vegetation	+1	-3
tatsächlich klassifizierte Fläche	0	0

Für die Landsat MSS-Szene kommt es wiederum zu geringfügigen Abweichungen in den Flächenstatistiken der beiden Unterklassen.

### (6) Kategorie „Bahnanlagen, Unter- und Überführungen“

Unter dieser Kategorie sind sowohl Gleisanlagen der Bahn als auch Flächen mit Gebäudekomplexen für den untertägigen Steinkohleabbau wie die Komplexe „Schacht An der Haard I“ und „Schacht Haltern 1/2“ zusammengefaßt (GK-Koordinaten ca.: <sup>25</sup>87, <sup>57</sup>30 und <sup>25</sup>82, <sup>57</sup>30; gemäß ATKIS-Objektartenkatalog, vgl. Kap. 4.2). Darüber hinaus sind die Bahnhöfe in Haltern und in Marl-Sinsen über die Maske erfaßt (vgl. Karte A.1, Anhang A). Da für diese Kategorie in erheblichem Umfang mit Ruderalflächen oder/und Brachen gerechnet wurde, werden die Unterklassen zum Großteil nach Vitalitätsgraden unterschieden. Die Klassifikationsergebnisse dokumentieren jedoch, daß für alle Aufnahmezeitpunkte die über die Klassifizierungen erfaßten kahlen/versiegelten Bereiche die größten Flächenanteile aller Unterklassen einnehmen. Dadurch, daß nur geringe Teile der Flächen vegetationsbestanden sind, scheint eine Einteilung nach Vitalitätsstufen für diese Kategorie zukünftig überflüssig. Die Schwankungen der Flächenanteile der einzelnen Unterklassen sind nicht signifikant; sie werden in Tabelle 5.20 dokumentiert. Gleiches gilt für die Klassifizierung der MSS-Szene, die nur unerheblich von der Klassifizierung der TM-Szene von 1991 abweicht. Der Trend für die Unterklassen bleibt ebenfalls bestehen.

Tab. 5.20: Flächendifferenzen der Kategorie Bahnanlagen, Unter- und Überführungen: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Bahnanlagen etc.: versiegelt bzw. kahler Boden	-7	+1
Bahnanlagen etc.: Vegetation 0,5-<0,6	+5	-1
Bahnanlagen etc.: Vegetation 0,6-<0,7	+2	0
Bahnanlagen etc.: Vegetation 0,7-<0,8	+1	0
tatsächlich klassifizierte Fläche	0	0

### (7) Kategorie „Freizeitbedarf“

Die Flächen dieser Kategorie sind im Untersuchungsraum recht weit verstreut, wobei die Mehrzahl der Flächen im Nordwesten in Haltern und Umgebung sowie am Ostrand des Untersuchungsgebietes liegen. Dabei befinden sich zwei größere Sportanlagen im Stadtgebiet von Haltern, östlich schließen sich zwei Freizeit-/Freibäder am Halterner Stausee an. Weiter südlich liegt eine weitere Sportanlage nordöstlich von Hamm sowie eine südlich von Flaesheim. Östlich davon sind ein Campingplatz am Ostufer des Baggersees sowie ein weiterer östlich von Westleven angesiedelt. Auch südlich davon liegen mehrere, zum Teil recht große Campinganlagen im Jammertal sowie westlich von Bockum (nordöstlich von Oer-Erkenschwick) im äußersten Südosten des Bildausschnitts (Karte A.1, Anhang A). Diese Kategorie faßt sehr viele verschiedene Nutzungsarten zusammen, so daß neben der üblichen Unterscheidung in vegetationsbestandene und vegetationslose Areale auch Wasserflächen (z.B. Schwimmbecken) sowie zusätzlich Nadelwaldflächen (bzw. verschattete Bereiche) isoliert werden. Die letztgenannte Unterklasse muß aufgrund der spezifischen Reflexions-

eigenschaften großer Flächen auf dem Gebiet des Westfälischen Landeskrankenhauses in der Lenkerbecker Mark generiert werden. Allerdings kommt es für diese Klasse sowie die Klasse „Wasserflächen“ zum Teil zu überschneidenden Klassifizierungen, die als mögliche Fehlklassifizierung anzusprechen sind (vgl. Kap. 6). Da keine detaillierten zeitlich passenden Informationen zu den Nutzungen vorliegen, können diese nicht weiter spezifiziert werden.

Die Unterklasse „versiegelte/kahle Bereiche“ umfaßt für den ersten und letzten Zeitschnitt etwa gleichbleibende Flächengrößen, wobei für die Szene vom 17.05.1986 mit 51 ha die mit Abstand größte Fläche für diese Unterklasse ausgewiesen wird. Die möglichen Gründe hierfür sind bereits im Rahmen der Erläuterungen zu anderen Kategorien angesprochen worden (s. „Schleusenbauwerke“, „Fläche: vegetationslos bzw. unbestimmbar“: Trockenschäden o.ä.). Allerdings kann eine Flächenveränderung dieser Größenordnung auch auf Umnutzung weiter Teile verweisen. Zugleich werden in dieser Szene zu geringe Flächenanteile für vegetationsbestandene Flächen klassifiziert (vgl. Tab. 5.21). Für die weiteren Unterklassen schwanken die angegebenen Flächenzahlen um bis zu 11 ha zwischen den einzelnen Szenen (vgl. Tab. 5.21).

Tab. 5.21: Flächendifferenzen der Kategorie Freizeitbedarf: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Freizeitbedarf: versiegelt bzw. kahler Boden	+16	-14
Freizeitbedarf: Wasserflächen	+2	-3
Freizeitbedarf: Nadelwald bzw. verschattete Flächen	-11	-1
Freizeitbedarf: Vegetation 0,5-<0,6	0	+6
Freizeitbedarf: Vegetation 0,6-<0,7	-6	+8
Freizeitbedarf: Vegetation 0,7-<0,8	-3	+3
Freizeitbedarf: Vegetation 0,8-<0,9	0	-1
Freizeitbedarf: Vegetation >=0,9	0	0
tatsächlich klassifizierte Fläche	0	0

In der Landsat MSS-Szene werden vegetationsbestandene Flächen im Vergleich zur Landsat TM-Szene deutlich über- und versiegelte/kahle Areale deutlich unterschätzt. Nur die klassifizierten Flächenzahlen für die Unterklassen „Wasserflächen“, Vegetation mit NDVI-Werten von 0,8-<0,9 und NDVI-Wert >=0,9 sind identisch mit denen der TM-Szene.

#### (8) Kategorie „Gartenland/Sonderkulturen“

Da für die Landnutzungen im Rahmen dieser Kategorie versucht wurde, Besonderheiten aufgrund ihrer Vitalitätsstufen zu isolieren (Tulpenfelder, Spargelfelder etc.), wird in einem ersten Ansatz nach verschiedenen Vitalitätsgraden differenziert. Einzelne Parzellen für die Kategorie „Gartenland/Sonderkulturen“ liegen südöstlich von Westrup, nördlich von Flaesheim sowie nordöstlich von Hamm. Leider dokumentieren die Klassifikationsergebnisse, daß dieser Ansatz nicht erfolgreich war. Zukünftig ist - zumindest für nicht sehr hoch

auflösende Sensordaten (30 m bzw. 10 m Pixelkantenlänge) - zu empfehlen, diese Kategorie mit anderen wie „Grünland“ oder „Ackerland“ zusammenzufassen. Mit fortschreitender phänologischer Entwicklung der Vegetation nimmt erwartungsgemäß der erfaßte Flächenanteil vegetationsbestandener Areale zu. Das heißt, daß auch für diese Kategorie mögliche andere Prozesse deutlich durch die Phänologie überlagert werden.

Die MSS-Szene zeigt im großen und ganzen identische Flächenzahlen im Vergleich zu der TM-Szene. Tabelle 5.22 zeigt die Zahlen im einzelnen.

Tab. 5.22: Flächendifferenzen der Kategorie Gartenland/Sonderkulturen: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Gartenland/Sonderkulturen: kahler Boden bzw. versiegelt	-2	-1
Gartenland/Sonderkulturen: Vegetation 0,5-<0,6	0	+1
Gartenland/Sonderkulturen: Vegetation 0,6-<0,7	+1	0
Gartenland/Sonderkulturen: Vegetation 0,7-<0,8	0	0
Gartenland/Sonderkulturen: Vegetation 0,8-<0,9	0	0
Gartenland/Sonderkulturen: Vegetation >=0,9	0	0
tatsächlich klassifizierte Fläche	0	0

#### (9) Kategorie „Grünland“

Diese Kategorie wird im Zuge der Veränderungsanalyse aufbauend untersucht. Zunächst erfolgt jedoch eine wissensbasierte Klassifikation (vgl. Karten 5.1 bis 5.3).

Flächen für Grünlandnutzung finden sich vor allem entlang des Lippeverlaufs in den Lippeauen. Zum Teil werden nordöstlich von Oer-Erkenschwick in der Umgebung von Bockum Flächen für die Grünlandbewirtschaftung genutzt (vgl. Karten A.1, Anhang A).

Für die Szene vom 01.05.1986 werden weite Teile der Kategorie als kahler Boden klassifiziert. Dies ist für Dauergrünlandflächen ungewöhnlich, da sie nicht wie Ackerflächen bearbeitet und umgepflügt werden. Statt dessen werden diese Flächen für die Beweidung vor allem von Mast- und Milchvieh vorgehalten. Darüber hinaus werden die Grünlandflächen gemäht, um Futter für das Vieh in den Wintermonaten zu gewinnen. Da dennoch kahler Boden in regelmäßig geformten rechteckigen Parzellen sichtbar ist, liegt es nahe, daß Dauergrünland in Ackerland umgewandelt wurde (vgl. Abb. 5.33).

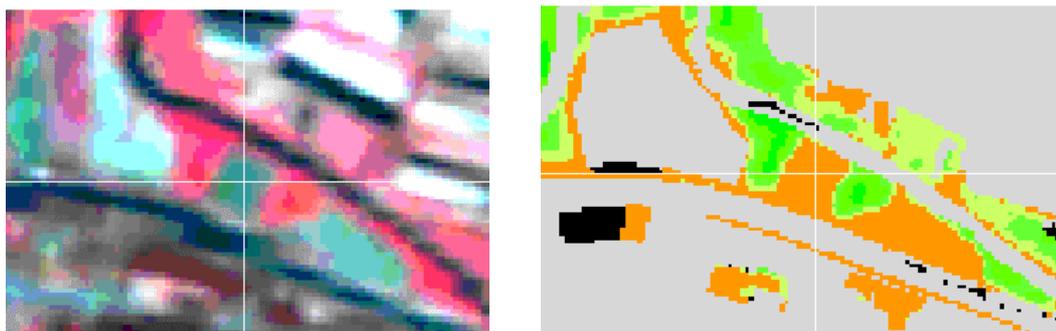
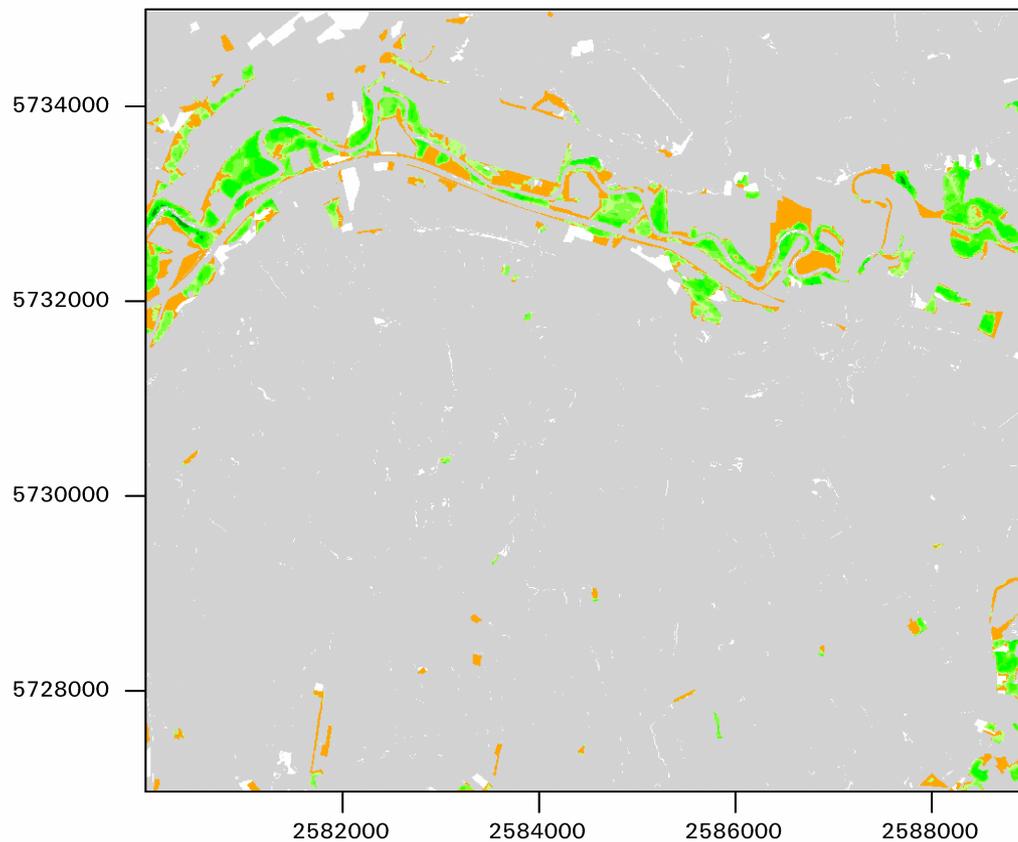


Abb. 5.33: Bildsegmentierung für die Kategorie „Grünland“, Landsat TM-Szene vom 01.05.1986: Klassifizierung von kahlem Untergrund und vegetationsbestandenen Flächen. Rechts im klassifizierten Bild ist exemplarisch eine kahle Fläche in der Form einer Ackerparzelle durch das Fadenkreuz hervorgehoben (orange=kahler Untergrund bzw. versiegelt; screenshots).

Diese Umwandlungen wurden in der Region bevorzugt in den 80er bis Mitte der 90er Jahre durchgeführt, bevor diese Praktik ab Mitte der 90er Jahre behördlicherseits schärfer kontrolliert und geahndet wurde. Spätestens mit der Entwicklung des Lippeauenprogramms (LIPPEVERBAND 1995) sind Aktivitäten solcher Art untersagt, da sie für die angestrebte Renaturierung weiter Strecken der Lippeaue kontraproduktiv wirken. Normalerweise wirkt die Grünlandzone in der Nachbarschaft zu Gewässern als Pufferzone und verhindert bzw. verringert den unmittelbaren Eintrag von Düngemitteln und Gülle in die Gewässer. Fehlt diese Pufferzone, so werden die Gewässer dadurch stark belastet (vgl. NIGGEMANN 1981, S. 35 ff.).

Diese Umwandlungen können nur dadurch detektiert werden, daß Anfang Mai 1986 diverse Ackerparzellen noch unbestellt sind. Wieviel Fläche tatsächlich für die einzelnen Jahre umgewandelt wurde, läßt sich aufgrund des zumeist gleichen Spektralverhaltens von Grünland und bestellten Ackerparzellen nicht sagen; zumal weitere Sekundärquellen z.B. bei der Landwirtschaftskammer Westfalen-Lippe oder Interviews mit den Landwirten nicht verfügbar sind. Schlüssig ist jedoch, daß der Anteil der als versiegelt/kahl klassifizierten Bereiche an der gesamten klassifizierten Fläche mit fortschreitender phänologischer Entwicklung der Pflanzen abnimmt (164 ha für das erste Datum, 57 bzw. 58 ha für den 17.05.1986 und den 02.07.1991), während der Anteil der klassifizierten vegetationsbestandenen Flächen zunimmt. Der Anteil der erfaßten Fläche für die Unterklasse „Grünland: vital 0,7-<0,8“ nimmt vom 01.05. bis zum 17.05.1986 sogar mit 92 ha sprunghaft zu, um für 1991 um 20 ha auf 151 ha zurückzugehen. Möglicherweise sind zum letzten Datum diverse Kulturpflanzen bereits abgeerntet, während andere Wuchszyklen noch nicht eingesetzt haben (Daten hierzu sind ebenfalls nicht verfügbar). Tabelle 5.23 zeigt die Entwicklungen im Detail für die einzelnen Unterklassen auf.

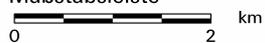
Karte 5.1 : Kategorie Grünland: wissensbasierte Klassifizierung  
 Datengrundlage: Landsat TM-Szene vom 01.05.1986



### Legende

Klassenbezeichnung	Fläche (ha)
nicht definiert	
Grünland: kahler Boden bzw. versiegelt	164
Grünland: vital 0.5-<0.6	77
Grünland: vital 0.6-<0.7	95
Grünland: vital 0.7-<0.8	79
Grünland: vital 0.8-<0.9	43
Grünland: vital $\geq 0.9$	2
nicht klassifiziert	
laut Maske klassifizierbare Fläche	513
tatsächlich klassifizierte Fläche	460

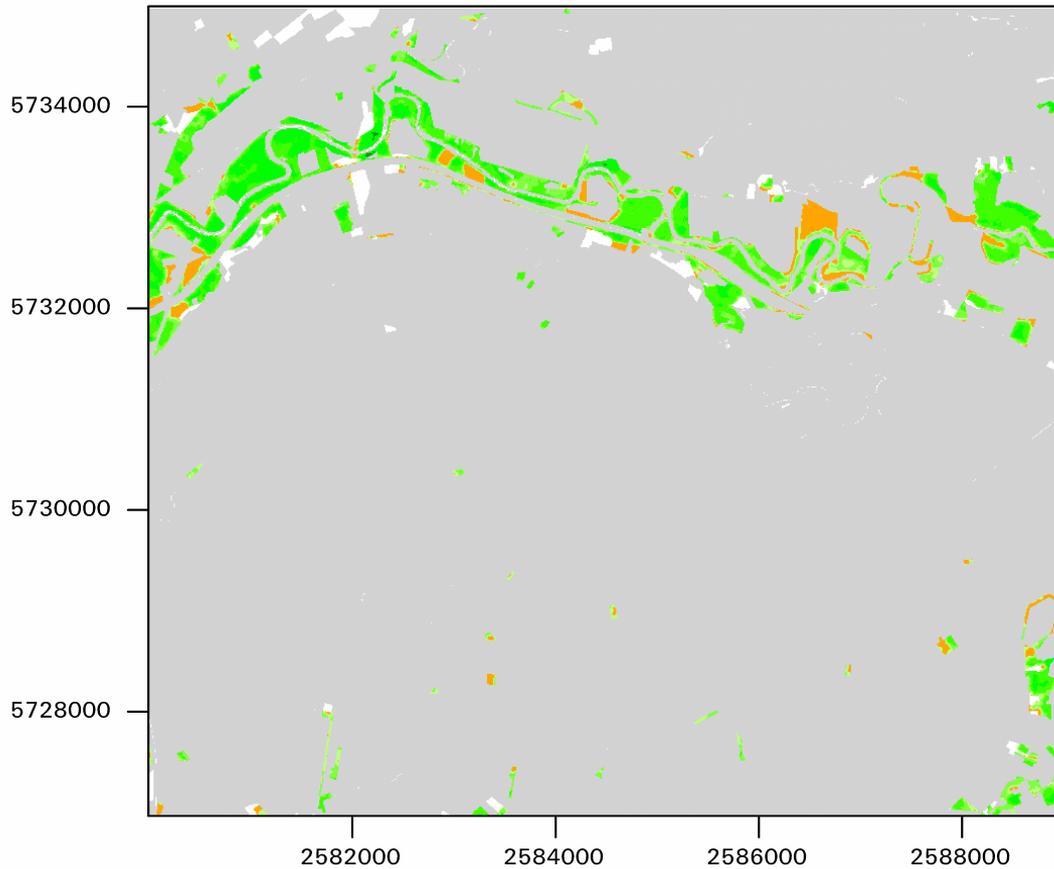
### Maßstabsleiste



Bearbeitung: Dipl.-Geographin Ch. Lechtenböcker (2000)  
 Datengrundlage: Landsat TM-Szene vom 01.05.1986, DSK, Abt. DG, Bottrop

## Karte 5.2 : Kategorie Grünland: wissensbasierte Klassifizierung

Datengrundlage: Landsat TM-Szene vom 17.05.1986



## Legende

Klassenbezeichnung	Fläche (ha)
 nicht definiert	
 Grünland: kahler Boden bzw. versiegelt	57
 Grünland: vital 0.5-<0.6	51
 Grünland: vital 0.6-<0.7	96
 Grünland: vital 0.7-<0.8	171
 Grünland: vital 0.8-<0.9	84
 Grünland: vital $\geq 0.9$	1
 nicht klassifiziert	
laut Maske klassifizierbare Fläche	513
tatsächlich klassifizierte Fläche	460

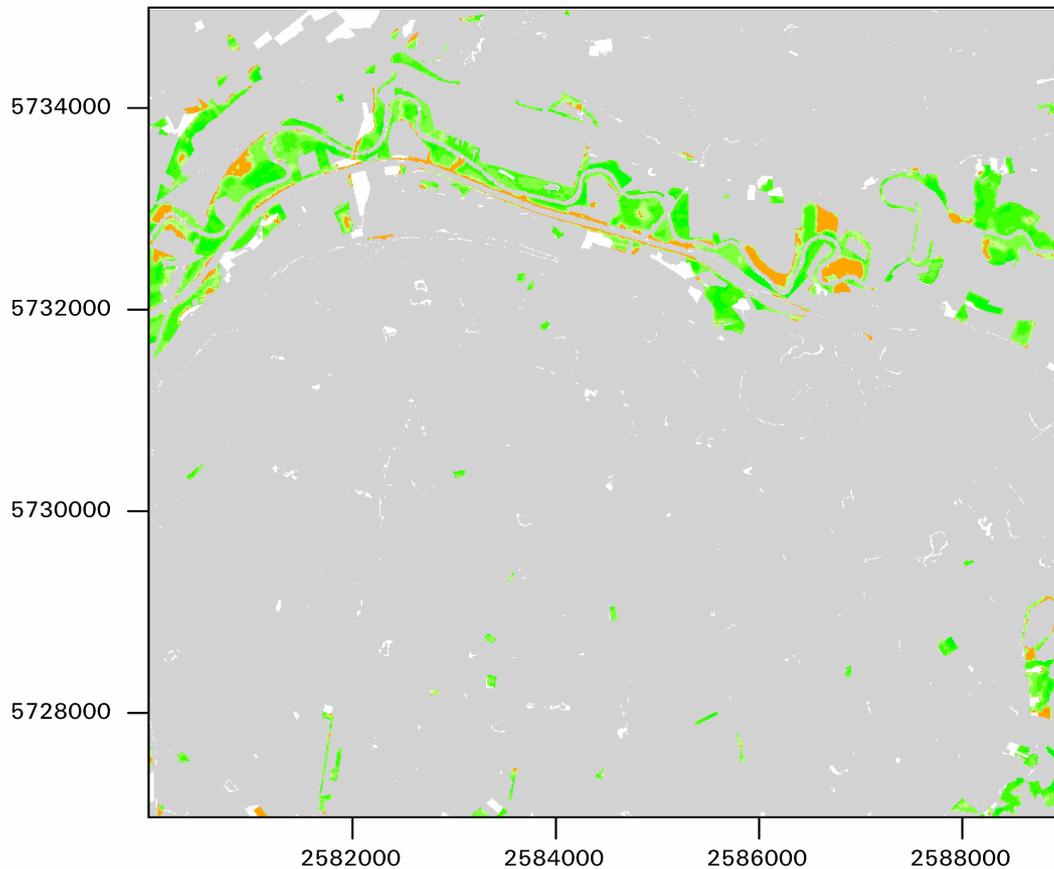
## Maßstabsleiste



Bearbeitung: Dipl.-Geographin Ch. Lechtenböcker (2000)  
 Datengrundlage: Landsat TM-Szene vom 17.05.1986, DSK, Abt. DG, Bottrop

## Karte 5.3 : Kategorie Grünland: wissensbasierte Klassifizierung

Datengrundlage: Landsat TM-Szene vom 02.07.1991



## Legende

Klassenbezeichnung	Fläche (ha)
nicht definiert	
Grünland: kahler Boden bzw. versiegelt	58
Grünland: vital 0.5-<0.6	64
Grünland: vital 0.6-<0.7	146
Grünland: vital 0.7-<0.8	151
Grünland: vital 0.8-<0.9	43
nicht klassifiziert	
laut Maske klassifizierbare Fläche	513
tatsächlich klassifizierte Fläche	461

## Maßstabsleiste



Bearbeitung: Dipl.-Geographin Ch. Lechtenböcker (2000)

Datengrundlage: Landsat TM-Szene vom 02.07.1991, DSK, Abt. DG, Bottrop

Tab. 5.23: Flächendifferenzen der Kategorie Grünland: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Grünland: kahler Boden bzw. versiegelt	-107	+1
Grünland: vital 0,5-<0,6	-26	+13
Grünland: vital 0,6-<0,7	+1	+50
Grünland: vital 0,7-<0,8	+92	-20
Grünland: vital 0,8-<0,9	+41	-41
Grünland: vital $\geq 0,9$	-1	-1
tatsächlich klassifizierte Fläche	0	+1

In der Landsat MSS-Szene wird mit nur 42 ha gegenüber 58 ha im Landsat TM-Bild der Anteil der als versiegelt/kahl klassifizierten Areale unterschätzt. Dagegen wird für die Unterklasse „vital 0,6-<0,7“ mit 185 ha (39 ha mehr) eine deutlich größere Fläche erfaßt. Die Flächenanteile der anderen Unterklassen schwanken innerhalb tolerabler, nicht signifikanter Grenzen.

#### (10) Kategorie „Ackerland“

Die Ackerflächen konzentrieren sich im Untersuchungsraum auf die Umgebung von Hamm im Westen, die Umgebung von Flaesheim östlich davon, verstreut liegen Flächen bei Bockum (nordöstlich von Oer-Erkenschwick). Außerdem werden weite Teile der Lippeaue südlich von Antrup und Flächen zwischen Hullern und Antrup im Nordosten der Szene ackerbaulich genutzt (vgl. Karten A.1, Anhang A). Erwartungsgemäß nimmt die Unterklasse „versiegelt bzw. kahler Boden“ für den Bildausschnitt vom 01.05.1986 mit 727 ha den größten klassifizierten Flächenanteil ein (Stichwort: phänologische Stadien). Als vegetationsbestanden werden demgegenüber nur 284 ha ausgewiesen. Mit zunehmendem Vitalitätsgrad, also steigendem NDVI-Wert, nehmen die erfaßten Flächengrößen rapide ab (vgl. Tab. 5.24). Der klassifizierte Anteil der zuerst genannten Unterklasse reduziert sich für den Ausschnitt vom 17.05.1986 um 261 ha auf 466 ha. Der klassifizierte Flächenanteil vegetationsdominierter Flächen steigt zum Teil sprunghaft an; das gilt vor allem für Klassen mit höheren Vitalitätsstufen: vital 0,7-<0,8: 51 ha zu 201 ha für den 17.05.1986. Dieses Verhältnis verschiebt sich für den Vergleich der Szene von Mitte Mai 1986 und der TM-Szene von Anfang Juli 1991. Die erfaßte Flächenausdehnung der Unterklasse „vital 0,6-<0,7“ nimmt nochmals sprunghaft um 79 ha auf 271 ha zu. Der Anteil der Klassen mit höheren Vitalitätsstufen zeigt nur mäßige Flächenzuwächse. Dies kann durch die unterschiedlichen Phänologien der Kulturpflanzen bedingt sein, die mögliche andere Entwicklungen sehr stark überlagern (s.o.). Tabelle 5.24 zeigt die Zahlen im Überblick.

Tab. 5.24: Flächendifferenzen der Kategorie Ackerland: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Ackerland: kahler Boden bzw. versiegelt	-261	-168
Ackerland: vital 0,5-<0,6	-6	+106
Ackerland: vital 0,6-<0,7	+98	+79
Ackerland: vital 0,7-<0,8	+150	-6
Ackerland: vital 0,8-<0,9	+21	-11
Ackerland: vital $\geq 0,9$	-1	0
tatsächlich klassifizierte Fläche	0	0

Für die Landsat MSS-Szene werden sehr viel größere Flächenanteile für die Klassen „vital 0,5-<0,6“ und „vital 0,6-<0,7“ erfaßt, die mit bis zu 130 ha Abweichung für Aufnahmen des gleichen Zeitpunkts auf grobe Ungenauigkeiten hindeuten, welche eventuell sensorbedingt sind (s.o.: Gründe für die Abweichungen). Für die Klasse „kahle/versiegelte Bereiche“ werden entsprechend kleinere Areale klassifiziert.

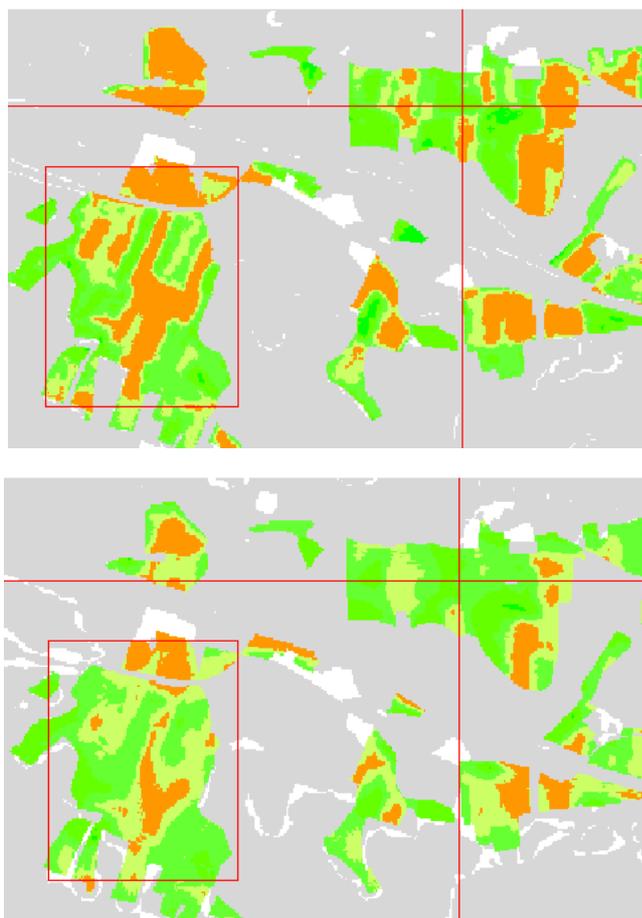


Abb. 5.34: Vergleich der Klassifizierungen der Landsat TM-Szene oben und der MSS-Szene unten. Kahle Flächen werden in der MSS-Szene deutlich unterschätzt (dargestellt in orange für beide Klassifizierungen, Fadenkreuz und Suchbox helfen bei der Orientierung; screenshots).

(11) Kategorie „Heide, Moor, Moos“

Diese Kategorie wird aus den gleichen Gründen wie die Kategorien „Schleusenbauwerke“ und „Gartenland/Sonderkulturen“ einzeln behandelt. Damit wird geprüft, ob Besonderheiten im Spektralverhalten allein über die Unterteilung in verschiedene Vitalitätsstufen extrahiert werden können. Die Klassifikationsergebnisse zeigen jedoch keine Besonderheiten auf; zumindest werden die flächenhaften Ausbreitungen der Vitalitätsstufen der Vegetation im jahreszeitlichen Verlauf der Szenen gut sichtbar. Heide-, Moor- und Moosflächen konzentrieren sich zum einen auf den Bereich der Westruper Heide an der Ostseite des Halturner Stausees. Zum anderen liegen kleinere Parzellen verstreut südlich von Puppendahl (bei Hamm) und nördlich von Sinsen (vgl. Karten A.1, Anhang A). Die klassifizierten Flächen sind mit insgesamt 5 ha zum Aufnahmedatum des 01.05.1986 kaum vegetationsbestanden. Dem stehen 73 ha erfaßte vegetationslose Fläche gegenüber. Mit 79 ha kann dabei fast die gesamte klassifizierbare Fläche von 80 ha erfaßt werden. Mitte Mai verlagern sich die Flächenverhältnisse der Unterklassen ein wenig. Die klassifizierten Areale für die Klassen „vegetationsbestanden“ der Vitalitätsstufen 0,5-<0,6 sowie 0,6-<0,7 nehmen deutlich an Umfang zu; die erfaßten Flächen für die Klasse „kahle/versiegelte Bereiche“ hingegen nehmen deutlich auf 53 ha ab. Dieser Trend setzt sich für die Aufnahme vom Juli 1991 fort (vgl. Tab. 5.25).

Tab. 5.25: Flächendifferenzen der Kategorie Heide, Moor, Moos: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Heide, Moor, Moos: kahler Boden bzw. versiegelt	-20	-33
Heide, Moor, Moos: vital 0,5-<0,6	+14	+15
Heide, Moor, Moos: vital 0,6-<0,7	+6	+9
Heide, Moor, Moos: vital 0,7-<0,8	+1	+8
Heide, Moor, Moos: vital 0,8-<0,9	0	+1
Heide, Moor, Moos: vital $\geq 0,9$	0	0
tatsächlich klassifizierte Fläche	0	0

Die Flächenanteile der einzelnen Unterklassen sind für die MSS-Szene etwas anders als für die TM-Szene verteilt, ohne daß jedoch auffällige Abweichungen in den Trends wie z.B. für die Kategorie „Ackerland“ sichtbar werden (s.o).

(12) Kategorie „Wald: laubwalddominiert“

Die Kategorie „Wald/Forst“ wird wie auch die Kategorie „Grünland“ im Zuge der exemplarisch durchgeführten Veränderungsanalysen weiterführend untersucht. Zunächst wird eine wissensbasierte Klassifikation durchgeführt, die einige Besonderheiten aufweist (vgl. Ausführungen weiter unten). Die Waldflächen konzentrieren sich auf das ausgedehnte Waldgebiet „Die Haard“ im Zentrum des Untersuchungsraums. Für die Kategorie „Wald“

allgemein müssen einige zusätzliche Unterklassen im Vergleich zu den anderen Kategorien unterschieden werden. Folglich wird die Klasse „Vegetation außer Wald“ isoliert, um z.B. brachgefallene Rodungsflächen in unterschiedlichen Sukzessionsstadien zu erfassen. Zusätzlich zu Vegetation in verschiedenen Sukzessionsstadien kann in der Unterklasse „Übergang nicht vital-vital“ Vegetation mit erster nennenswerter Vitalität isoliert werden. Dies geschieht für die Waldflächen häufig in einem Wechselspiel der Reflexionen von Vegetation mit durchscheinendem Boden- und Baumholzanteil. Diese Unterscheidung führt zugleich zu einem Sonderfall der Klassifikation laubwalddominierter Flächen für die Szene vom 01.05.1986, da laubwalddominierte Areale aufgrund ihres Spektralverhaltens zu dieser frühen Jahreszeit zu einem Großteil über diese Unterklasse erfaßt werden, statt der Klasse „laubwalddominiert“ zugewiesen zu werden. Demzufolge werden für die Unterklasse „Übergang nicht vital-vital“ für den 01.05.1986 insgesamt 1492 ha klassifiziert. Unterklassen, die verschiedene Vitalitätsstufen über NDVI-Werte ausweisen, erfassen nur insgesamt 16 ha. Diese erfaßten Flächenanteile verschieben sich schon für die Aufnahme vom 17.05.1986 sehr deutlich. Hier deckt die Klasse „laubwalddominiert vital 0,6-<0,7“ mit 1097 ha die größte klassifizierte Fläche ab. Außerdem weisen die Klassen „laubwalddominiert vital 0,7-<0,8“ und „laubwalddominiert vital 0,5-<0,6“ mit +460 ha und +329 ha ebenfalls große Flächenzuwächse der klassifizierten Areale auf. Entsprechend gehen die Zahlen für erfaßte „kahle/versiegelte Bereiche“ und die Klasse „Übergang nicht vital-vital“ zurück. Diese Zahlen verschieben sich für die Szene vom Juli 1991 noch weiter in Richtung der Klassen mit höheren NDVI-Werten. Hier deckt die Klasse „laubwalddominiert vital 0,7-<0,8“ mit insgesamt 1165 ha die größte klassifizierte Fläche ab. Aber auch die darunter und die darüber liegenden Unterklassen zeigen noch große erfaßte Flächenausdehnungen.

Eine vergleichende Quantifizierung der tatsächlich klassifizierten Flächen zu der gesamten klassifizierbaren Fläche ergibt gänzlich andere Ergebnisse als die Flächenbilanzierungen der anderen Kategorien. Über die ATKIS-Daten steht nur die Gesamtfläche für die Kategorie „Wald/Forst“ zur Verfügung, ohne daß dabei zwischen laub- und nadelwalddominierten Bereichen unterschieden wird. Die Trennung von laubwald- und nadelwalddominierten Flächen wird über die wissensbasierte Klassifikation allein durch den Grauwert 65 im NIR (s.o.) vorgenommen. Der Flächenanteil der tatsächlich klassifizierten Areale schwankt zwischen den einzelnen Aufnahmen erheblich und nimmt mit fortschreitender Jahreszeit stark zu (1986: 1666 ha, 1974 ha; 1991: 2244 ha). Die Flächenzuwächse sind vor allem in den Klassen zu verzeichnen, die über höhere NDVI-Werte definiert sind. Daraus ergibt sich, daß der Flächenanteil laubwalddominierter Bereiche in den Szenen von 1986 unter anderem durch die frühe Jahreszeit der Klasse „Übergang nicht vital-vital“ zugeordnet wird, weil eine Trennung allein aufgrund der Spektraleigenschaften nicht möglich ist (vgl. Fehlerdiskussion Kap. 6, vgl. Tab. 5.26). Dadurch werden deutlich zu kleine Flächen als laubwalddominiert erfaßt.

Tab. 5.26: Flächendifferenzen der Kategorie Wald (laubwalddominiert): Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Wald: kahler Boden bzw. versiegelt	-139	+46
Wald: Übergang nicht vital-vital	-1471	-2
Wald: Vegetation außer Wald, vital $\geq 0,6$	-12	+16
Wald: laubwalddominiert vital 0,5-<0,6	+329	-306
Wald: laubwalddominiert vital 0,6-<0,7	+1095	-549
Wald: laubwalddominiert vital 0,7-<0,8	+460	+704
Wald: laubwalddominiert vital 0,8-<0,9	+46	+361
Wald: laubwalddominiert vital $\geq 0,9$	0	+2
tatsächlich klassifizierte Fläche	+308	+270

Für die Klassifizierung der MSS-Szene sind die Flächenanteile der Unterklassen deutlich gegenüber der Klassifikation der TM-Szene verschoben. Für die Klasse „laubwalddominiert vital 0,7-<0,8“ wird mit einem Unterschied von +326 ha deutlich mehr Fläche klassifiziert. Die Unterklasse „Vegetation außer Wald“ zeigt ebenfalls eine sehr viel größere klassifizierte Flächenausdehnung; viele Nutzungssäume sind zudem nicht über die Klassifikation erfaßt worden.

### (13) Kategorie „Wald: nadelwalddominiert“

Für diese Kategorie werden wegen der besseren Übersicht wie schon für die Kategorie „Wald: laubwalddominiert“ zum Teil identische zusätzliche Unterklassen gebildet (s.o.), um die Variationsbreite innerhalb der übergeordneten Kategorie „Wald/Forst“ laut ATKIS-Daten erfassen zu können. Dadurch sind die Ergebnisse dieser Klassifizierung für die Unterklassen „kahler Boden bzw. versiegelt“, „Übergang nicht vital-vital“ und „Vegetation außer Wald“ identisch mit den zuvor ermittelten Resultaten der Klassifizierung für die Kategorie „Wald: laubwalddominiert“. Für die Aufnahme vom 01.05.1986 bedeutet dies z.B. erneut, daß ein sehr hoher Flächenanteil von 1492 ha für die Klasse „Übergang nicht vital-vital“ erfaßt wird. Für diesen Aufnahmezeitpunkt dominiert die Unterklasse „nadelwalddominiert vital 0,6-<0,7“ mit 1588 ha klassifizierter Fläche, gefolgt von der Klasse „nadelwalddominiert vital 0,5-<0,6 ha“ mit 800 ha erfaßter Fläche. Insgesamt werden über die wissensbasierte Klassifikation 4440 ha klassifiziert; maximal können 4622 ha der Kategorie „Wald/Forst“ klassifiziert werden. Für den 17.05.1986 reduziert sich die über die Klassifizierung erfaßte Flächenzahl auf 2493 ha klassifizierter Fläche insgesamt. Hier weist die Unterklasse „nadelwalddominiert vital 0,5-<0,6“ mit 1489 ha die größte klassifizierte Fläche auf, während für die darüber liegende Klasse (NDVI-Werte bei 0,6-<0,7) der erfaßte Flächenanteil halbiert wurde. Diese klassifizierte rückläufige Entwicklung für Klassen mit höheren NDVI-Werten könnte zum einen mit dem ca. Mitte Mai einsetzenden phänologischen Stadium der Blüte vieler Nadelbaumarten erklärt werden (s.o., DWD 1991, S. 51 ff.). Zum anderen können weite Teile nicht mit dem Klassifikationsansatz erfaßt werden, so daß diese Flächen aus der Klassifizierung „herausfallen“ und für die Flächenbilanzierung nicht zur

Verfügung stehen (vgl. Kap. 6). Diese Entwicklung wird für die Szene vom Juli 1991 erneut umgekehrt. Zwar wird insgesamt weniger Fläche als nadelwalddominiert klassifiziert, jedoch zeigen Klassen mit NDVI-Werten ab 0,6 deutliche Zunahmen für die erfaßten Flächen. Die Unterklasse „nadelwalddominiert vital 0,5-<0,6“ hingegen belegt nur noch eine klassifizierte Fläche von 565 ha (vgl. Tab. 5.27).

Tab. 5.27: Flächendifferenzen der Kategorie Wald (nadelwalddominiert): Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Wald: kahler Boden bzw. versiegelt	-139	+46
Wald: Übergang nicht vital-vital	-1471	-2
Wald: Vegetation außer Wald, vital $\geq 0,6$	-12	+16
Wald: nadelwalddominiert vital 0,5-<0,6	+689	-924
Wald: nadelwalddominiert vital 0,6-<0,7	-782	+710
Wald: nadelwalddominiert vital 0,7-<0,8	-316	+94
Wald: nadelwalddominiert vital 0,8-<0,9	-44	0
Wald: nadelwalddominiert vital $\geq 0,9$	-1	0
tatsächlich klassifizierte Fläche	-1974	-190

Für die Landsat MSS-Szene ist der Trend der Flächenanteile der einzelnen Unterklassen identisch mit dem der TM-Szene. Allerdings wird für die Unterklasse „nadelwalddominiert vital 0,6-<0,7“ eine überproportional größere Fläche erfaßt (1635 ha). Für die darunterliegende Klasse ist dieser Trend gegenläufig.

#### (14) Kategorie „Gehölz/nasser Boden“

Die Flächen dieser Kategorie liegen häufig als Übergangssäume an Nutzungsgrenzen, hier dann vor allem begleitend zu Verkehrswegen wie Straßen, Gleisen etc. Einige Gehölzbereiche begleiten in schmalen Streifen den Verlauf der Lippe. Mit 196 ha ist die Flächenausdehnung dieser vorwiegend begleitenden Flächen recht groß. Allerdings kann für alle Satellitenbildszenen jeweils nur ca. die Hälfte der Flächen isoliert werden. Naturgemäß ist der Anteil der klassifizierten kahlen/versiegelten Bereiche in der Aufnahme vom 01.05.1986 mit 78 ha recht hoch (Stichwort: Phänologie). In den beiden folgenden Szenen geht der klassifizierte Anteil auf ca. 30 ha zurück, während die höchsten Flächenanteile für die Unterklasse „vital 0,6-<0,7“ verbucht werden. Besonderheiten wie z.B. Rodung oder/und Umnutzung von Flächen können aus den Ergebnissen der Flächenbilanzierung nicht interpretiert werden, da die Schwankungsbreiten durchaus als „normal“ zu bezeichnen sind (Stichwort: Phänologie, vgl. Tab. 5.28).

Tab. 5.28: Flächendifferenzen der Kategorie Gehölz/nasser Boden: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Gehölz, nasser Boden: kahler Boden bzw. versiegelt	-46	-2
Gehölz, nasser Boden: vital 0,5-<0,6	+16	-7
Gehölz, nasser Boden: vital 0,6-<0,7	+17	+7
Gehölz, nasser Boden: vital 0,7-<0,8	+10	+4
Gehölz, nasser Boden: vital 0,8-<0,9	+3	-1
Gehölz, nasser Boden: vital >=0,9	0	0
tatsächlich klassifizierte Fläche	0	+1

Die Flächenverteilung für die einzelnen Unterklassen der MSS-Szene weichen nur unerheblich von der Flächenverteilung der TM-Szene ab. Diese Abweichungen sind wahrscheinlich sensorbedingt (s.o.) und nicht - wie zum Teil zuvor im Rahmen von Flächenbilanzierungen angesprochen - auf Rundungsfehler zurückzuführen.

#### (15) Kategorie „Flächen mit besonderer funktionaler Bedeutung“

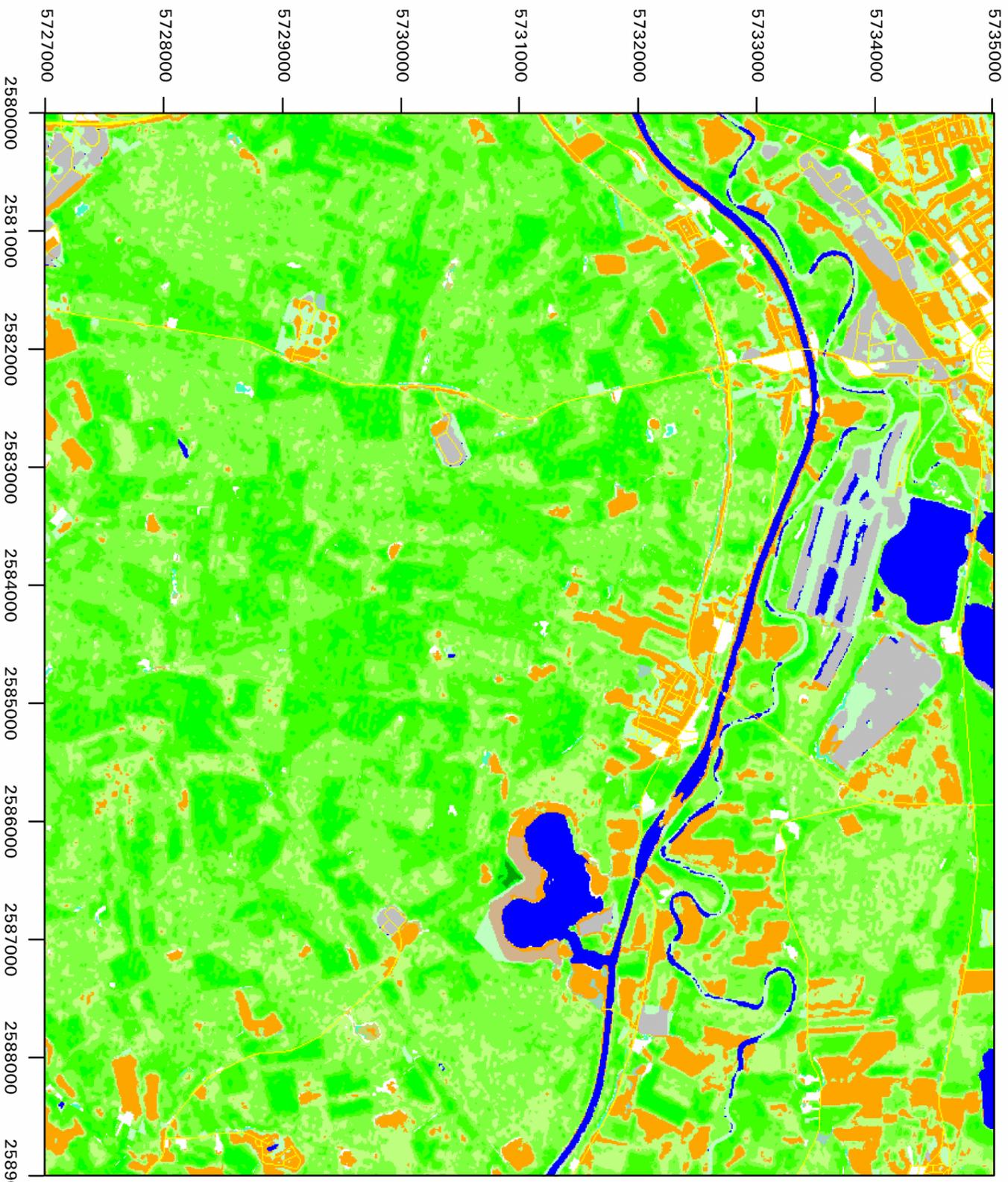
Diese Kategorie deckt nur 60 ha des gesamten Untersuchungsraumes ab. Allerdings wird sie aus den gleichen Gründen wie schon die Kategorie „Schleusenbauwerke“ und „Gartenland/Sonderkulturen“ (s.o.) isoliert. Die Flächen liegen verstreut im gesamten Untersuchungsraum: dazu gehören der Komplex des Westfälischen Landeskrankenhauses in der Lembecker Mark, der Bereich ehemaliges Haus Mahlenburg, das ADAC-Trainingsgelände sowie zwei Schulgelände in Haltern (vgl. Karten A.1, Anhang A). Die klassifizierten Flächenanteile der Klassen schwanken für alle drei TM-Szenen kaum. Auch die Ergebnisse der Klassifizierung für die MSS-Szene weisen im Vergleich zur TM-Szene vom gleichen Datum keine eklatanten Abweichungen auf. Diese Kategorie könnte zukünftig z.B. mit der Kategorie „Wohnbauflächen“ aus Gründen der Effizienz zusammengefaßt werden. Tabelle 5.29 dokumentiert die Zahlen im Detail.

Tab. 5.29: Flächendifferenzen der Kategorie Flächen mit besonderer funktionaler Bedeutung: Vergleich der Landsat TM-Szenen in chronologischer Reihenfolge vom 01.05.1986 zum 17.05.1986 (Zahlenkolonne links) und vom 17.05.1986 zum 02.07.1991 (Zahlenkolonne rechts)

Klassen	Flächendifferenzen (ha)	
Fläche: versiegelt bzw. kahler Boden	-11	-2
Fläche: vegetationsverdeckt bzw. Vegetation	+12	+1
tatsächlich klassifizierte Fläche	0	0

#### (16) Kategorie „Straßenflächen“

Diese Kategorie wird in den ATKIS-Daten nur als Liniensignatur geliefert und kann demzufolge nicht als flächenhafte Maske in die wissenschaftlichen Klassifikationen implementiert werden. Eine Liniensignatur ist wegen der relativ schlechten Bodenauflösung der



**Karte 5.4 : Synthesekarte der Einzelklassifikationen**  
 Datengrundlage: Landsat TM-Szene vom 02.07.1991

- Legende**
- Klassenbezeichnung**
- nicht definiert
  - Straßenflächen durch Liniensignaturen repräsentiert
  - Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen
  - kahler Boden bzw. versiegelt
  - Fläche: vegetationslos bzw. unbestimmbar
  - Fläche: vegetationsverdeckt bzw. vegetationsbestanden
  - Wald: Übergang nicht vital-vital (Reflexion v. Boden, Holz etc.)
  - Wald: Vegetation außer Wald, vital  $\geq 0.6$
  - Vegetation: vital  $0.5 < 0.6$
  - Vegetation: vital  $0.6 < 0.7$
  - Vegetation: vital  $0.7 < 0.8$
  - Vegetation: vital  $0.8 < 0.9$
  - Vegetation: vital  $\geq 0.9$
  - Gewässer
- Maßstabsleiste**
- 0  1 km

Bearbeitung: Dipl.-Geogr. Ch. Lechtenböcker (2000)  
 Datengrundlage: Landsat TM-Szene vom 02.07.1991, DSK, Abt. DG, Bottrop

Sensoren als Eingangsvariable (z.B. mit definierten Pufferzonen für linienbegleitende Säume) eher ungeeignet. Vielmehr empfiehlt sich die Abgrenzung von Straßenflächen im Rahmen bestehender Bildsegmente, da die Straßenflächen aufgrund ihrer recht eindeutigen Spektraleigenschaften zufriedenstellend von anderen Objekten isoliert werden können. Als Orientierungshilfe ist die Liniensignatur der Straßenflächen in den Synthesekarten der einzelnen Satellitenbildszenen jedoch gut geeignet.

#### (17) Synthesekarten der wissensbasierten Klassifikationen

Die Synthesekarten für die einzelnen Aufnahmen geben - wie schon die Karten der Luftbildmosaik - einen guten Überblick über die Verteilung der Nutzungsstrukturen. Dabei unterscheiden diese Karten die Kategorien „Straßenflächen“ als Liniensignatur, „Industrie-, Gewerbe-, Sonderflächen“, „Fläche: vegetationslos bzw. unbestimmbar“, „Wald: Übergang nicht vital-vital“, „Wald: Vegetation außer Wald“ und „Gewässer“. Die anderen Klassen werden übergreifend nach NDVI-Werten den Vitalitätsstufen 0,5 bis  $\geq 0,9$  zugewiesen. Raummuster, die Hinweise auf Zusammenhänge geben können, werden somit aufgedeckt. Es besteht dann die Möglichkeit, Ursachen und Hintergründe weiterführend zu untersuchen (vgl. Karte 5.4).

### 5.1.4 Ergebnisse der exemplarisch durchgeführten Veränderungsanalysen

Die Ergebnisse der exemplarischen Veränderungsanalysen stellen neben den Resultaten der wissensbasierten Einzelbildklassifikationen weitere wichtige Informationsquellen für umweltschutz- oder ökologisch relevante Fragestellungen bereit (vgl. Karte 5.5). Die Analysen bauen auf den Einzelbildklassifikationen auf, wobei die Klassifikationsergebnisse die notwendigen Eingangsinformationen für die Untersuchungen bereitstellen.

Die wissensbasierten Klassifikationen ermöglichen - wie in Kapitel 5.1.3 bereits ausgeführt - zwar erste Quantifizierungen von möglichen Veränderungen. Allerdings sind die Einzelbildklassifikationen nicht dafür ausgelegt, detaillierte Informationen über Veränderungen bereitzustellen; die Ergebnisse der vergleichenden Untersuchungen sind entsprechend stark fehlerbehaftet (vgl. Kap. 5.1.3).

Demgegenüber zeigen die Resultate der Veränderungsanalysen, deren Methodik in dieser Arbeit entwickelt wurde, relevante Vorteile:

1. Veränderungen können hierüber im Raum verortet werden; sie können natürlich auch quantifiziert werden.
2. Tatsächliche Veränderungen können in der Regel gut von vermeintlichen Veränderungen unterschieden werden, da sie durch Veränderungsflächen mit homogener, flächenhafter Textur - statt inhomogener, „fleckenhafter“ Textur - angezeigt werden (z.B. Veränderungen in Waldarealen: homogene Textur kann auf Rodungen hindeuten, inhomogene Textur auf Reflexionswechsel durch Licht- und Schattenspiel in den Baumkronen).

Allerdings können die Veränderungsanalysen starke Schwankungen im Spektralverhalten von Vegetation infolge phänologischer Stadien nur bedingt auffangen, so daß Ergebnisse dieser Vergleiche durch die Phänologie durchaus verfälscht werden können. Sehr deutlich wird der Einfluß der Phänologie für Ackerflächen. Hier kann die Veränderungsanalyse letztendlich nur die Fruchtfolgewechsel auf den Parzellen widerspiegeln und kaum tatsächlich geschehene Veränderungen extrahieren.

3. Die hier entwickelte Methodik ermöglicht zudem, über klassen- bzw. kategorieinterne Untersuchungen hinaus klassen- und kategorieübergreifende Veränderungsanalysen durchzuführen; das wird im Verlauf dieses Kapitels näher erläutert.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden Veränderungsanalysen exemplarisch für die Kategorien „Grünland“ und „Wald“ für alle Fernerkundungsdatensätze durchgeführt. Die Kategorie „Gewässer“ wird für die TM-Datensätze gesondert untersucht (vgl. unten). Die ausgewählten Kategorien sind im Vergleich zu allen anderen Kategorien für umwelt-schutzrelevante Fragestellungen elementar.

Da die Datensätze zum einen aufgrund ihrer sehr unterschiedlichen Spektraleigenschaften (CIR- und Color-Luftbildmosaike) und zum anderen durch die sehr verschiedenen phänologischen Stadien in den einzelnen Aufnahmen nicht für detaillierte Analysen geeignet sind (vgl. auch Kap. 5.1.3), konzentrieren sich die Untersuchungen auf folgende Aspekte:

*Luftbildmosaike:*

- Veränderungen vegetationsbestandener Grünlandflächen,
- Veränderungen vegetationsfreier Grünlandflächen,
- Veränderungen der laubwalddominierten Flächen,
- Veränderungen des Reflexionsanteils von durchscheinendem Boden und Baumholz für laubwalddominierte Flächen,
- Veränderungen der nadelwalddominierten Flächen,
- Veränderungen des Reflexionsanteils von durchscheinendem Boden und Baumholz für nadelwalddominierte Flächen.

*TM-Datensätze:*

- Veränderungen vegetationsbestandener Grünlandflächen,
- Veränderungen laubwalddominierter Flächen,
- Veränderungen nadelwalddominierter Flächen,
- Veränderungen vegetationsfreier Waldflächen,
- Veränderungen von Gewässerflächen (Beispiel Baggersee; Details vgl. unten).

Hierfür müssen die Unterklassen der Kategorien, die für das CIR-Luftbildmosaik Vitalitätsstufen dokumentieren, zunächst rekodiert werden (vgl. Kap. 4.2). Danach kann eine Veränderungsanalyse der Einzelbildklassifikationen durchgeführt werden. In ähnlicher Art und Weise müssen die vitalitätsdifferenzierenden Unterklassen der einzelnen TM-Datensätze rekodiert werden, da die phänologischen Stadien der einzelnen Bilder zu unterschiedlich für einen Vergleich der Vitalität der Vegetation sind (vgl. Kap. 4.2). Die Veränderungsanalyse wird daher für die vegetationsdominierten Kategorien in allen Fernerkundungsdatensätzen

auf zwei „neue“ Unterklassen reduziert: „vegetationsverdeckt“ und „kahle bzw. versiegelte Bereiche“. Die Rekodierung der Kategorie „Gewässer“ isoliert lediglich die Klasse 1 „Gewässer“, während alle anderen Klassen auf 0 gesetzt werden (Details Kap. 4.2).

Die Ergebnisbilder der Untersuchungen der vegetationsverdeckten Flächen, der vegetationslosen Areale und der Wasserflächen zeigen zunächst nur an, ob vegetationsverdeckte/vegetationslose oder wasserverdeckte Flächen wegfallen oder reduziert worden sind, oder ob es Flächenzuwächse gibt bzw. neue Flächen entstanden sind. Im Zuge dieses ersten Analyseschritts werden folglich nur die Richtungen (Zuwachs - Abnahme) der Veränderungen angezeigt (vgl. die Analyse über den spektralen Veränderungsvektor, Kap. 4.2). Welcher Art die kategorieinternen Variationen oder auch die Kategoriewechsel von Flächen sind (=Reduktion der Flächen in der untersuchten Kategorie/Klasse), kann dann in den folgenden vergleichenden Veränderungsanalysen untersucht werden. Diese Zusammenhänge werden nachfolgend erläutert:

1. Für die Analysen der Luftbildmosaike bedeutet dies z.B., daß in einem ersten Untersuchungs-/Arbeitsschritt die Klassen „vegetationsverdeckt“ und „kahle bzw. versiegelte Bereiche“ getrennt voneinander für die Fernerkundungsdatensätze in den gegebenen Zeitschnitten einer Veränderungsanalyse unterzogen werden. Als Ergebnis liegen pro Analyse (Vergleich von je zwei Fernerkundungsdatensätzen) zwei Ergebniskarten vor:
  - Eine Ergebniskarte dokumentiert Flächenzuwächse bzw. -reduzierungen für vegetationsverdeckte Areale, und
  - eine Ergebniskarte zeigt Flächenzuwächse oder -reduzierungen für kahle/versiegelte Flächen auf.Zunächst ist also nur die Richtung der Veränderung bekannt.
2. Tatsächliche Wechsel werden durch Flächen mit homogener Textur bzw. fast flächenhafter Einfärbung in rot oder grün angezeigt (s.u.).
3. Erste visuelle Auswertungen der beiden Ergebniskarten pro Analyse zeigen für die Beispiele einen deutlichen Trend: Der Wegfall vegetationsbestandener Flächen bedeutet zumeist einen Flächenzuwachs für die Klasse „kahle bzw. versiegelte Bereiche“ - und umgekehrt. Die Frage, ob und welche Klassenwechsel (auch Kategoriewechsel sind möglich) hier stattgefunden haben, ist für die vorliegenden Beispiele recht eindeutig.
4. Da dies jedoch nicht nur rein visuell abgeschätzt werden soll, können solche Veränderungen über weitere Modifikationen in der vorbereitenden Rekodierung der Klassen sowie in der zweckentfremdeten Nutzung des Moduls „change detection“ untersucht werden. Das heißt, daß beispielsweise der Wechsel von vegetationsbestandenen Grünlandflächen in wasserverdeckte Grünlandflächen untersucht wird, indem
  - die Kodierung von vegetationsbestandenen Flächen des „Vorherbildes“ und die Kodierung von wasserverdeckten Flächen des „Nachherbildes“ auf eine identische Klassennummer rekodiert werden (z.B. Nr. 10);
  - diese rekodierten und nur auf diese Klasse 10 reduzierten Datensätze („0“-Multiplikation nicht relevanter Klassen bei der Rekodierung) in das Modul eingespeist werden;

- Flächen, die innerhalb der Bildsegmentation/Maske für die Kategorie „Grünland“ keine Veränderung dokumentieren (i.d.R. grau gefärbt), den Wechsel von vegetationsbestandenen zu wasserverdeckten Arealen aufzeigen. Sonstige Flächenzuwächse oder -reduzierungen werden laut Moduleinstellungen in Grün bzw. in Rot markiert. Nur dort, wo z.B. die Klassennummer 10 im Rahmen der Rekodierung für die Landbedeckungen beider Einzelbildklassifikationen bestehen bleibt, wird durch die „Zweckentfremdung“ signalisiert, daß (vermeintlich) keine Veränderungen eingetreten sind. Dies ist dann als Kategorievariation/Klassenwechsel von vegetationsbestanden zu wasserverdeckt zu interpretieren (vgl. Abb. 5.35). Dieser Ansatz läßt sich auch auf die Ebene der Kategorien übertragen. Voraussetzung dafür ist, daß die Bildsegmentationen entsprechend der zu untersuchenden Kategorien modifiziert bzw. erweitert werden. Da diese weiterführenden Analysen jedoch über den Rahmen dieser Arbeit hinausgehen, werden sie nicht vertieft.

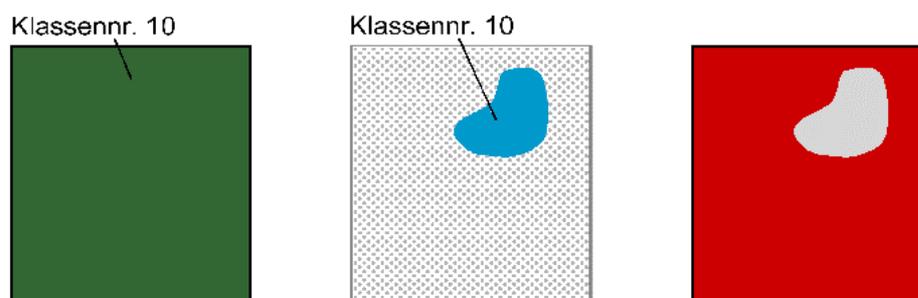


Abb. 5.35: Beispielhafter Ablauf einer klassenübergreifenden Veränderungsanalyse: links das „Vorherbild“, eine vegetationsbestandene Grünlandfläche, die auf die Klassennummer 10 rekodiert wurde. In der Mitte: das „Nachherbild“ des gleichen Geländeausschnitts, in dem eine Wasserfläche auf die Klassennummer 10 rekodiert wurde. In der Abbildung rechts ist das Ergebnis der Veränderungsanalyse zu sehen: dort wo keine Veränderungen angezeigt werden (graue Fläche) hat tatsächlich Veränderung stattgefunden, die rot gefärbte Fläche zeigt vermeintlich Veränderungen an; dies ist auf die Rekodierung zurückzuführen.

Die folgenden Veränderungsanalysen konzentrieren sich auf die Flächenzuwächse und -reduzierungen innerhalb der Klassen. Zunächst werden die Veränderungen nach Kategorien geordnet für die Luftbildmosaike dokumentiert, bevor anschließend die Ergebnisse der Analysen für die Untersuchungen der Landsat TM-Datensätze vorgestellt werden.

#### 5.1.4.1 Veränderungsanalyse der Luftbildmosaike

Für die Luftbilddatensätze werden sechs verschiedene Analysen durchgeführt; dies entspricht den einzelnen Klassifikationsdesigns pro Klasse.

##### (1) Kategorie „Grünland“

Die Analyse vegetationsbestandener Grünlandflächen dokumentiert die bereits angesprochene Umwandlung einiger Flächen zu Ackerland und einiger kleinerer Areale zu Sportplätzen

(vgl. Kap. 5.1.3.3). Dies wird durch fast flächendeckend klassifizierte neue Flächen (grün) oder weggefallene Areale (rot) angezeigt (vgl. Abb. 5.36: homogene Texturierung der Flächen).

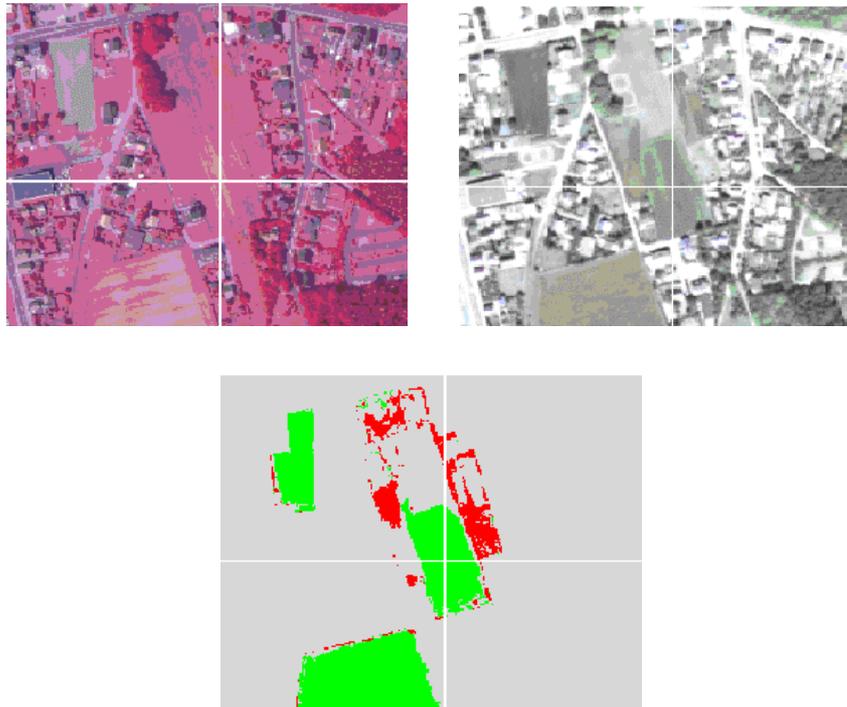


Abb. 5.36: Veränderungsanalyse vegetationsbestandener Grünlandflächen: Zunahme der Flächen, die durch ihre Größe und Form relativ sicher als Ackerparzellen zu identifizieren sind (oben links: CIR-Luftbildmosaik 1985, oben rechts: Color-Luftbildmosaik 1990, unten Mitte: Ergebnis der Veränderungsanalyse; grün gefärbte Flächen; screenshots).

Die Umnutzung zu Sportplätzen ist direkt aus den Luftbildszenen abzulesen; die Veränderungsanalyse akzentuiert diese Veränderungen jedoch und deckt stark beanspruchte Flächen auf, in denen die Vegetation bzw. die Rasenflächen zerstört worden sind (vgl. Abb. 5.37).

Flächen, die keiner tatsächlichen Veränderung unterliegen, zeigen entsprechend eine gröbere Textur von Rot/Grün und Grau an. Das bedeutet, daß die als verändert diagnostizierten Bereiche nicht flächenhaft verändert sind. „Marmorierte“ Areale dieser Art treten häufig in Waldgebieten auf; Abbildung 5.38 zeigt ein weiteres Beispiel für Grünland. Hier hat kein Nutzungswechsel stattgefunden; vielmehr ist davon auszugehen, daß jahreszeitlich bedingt 1990 Trockenschäden aufgetreten sind.

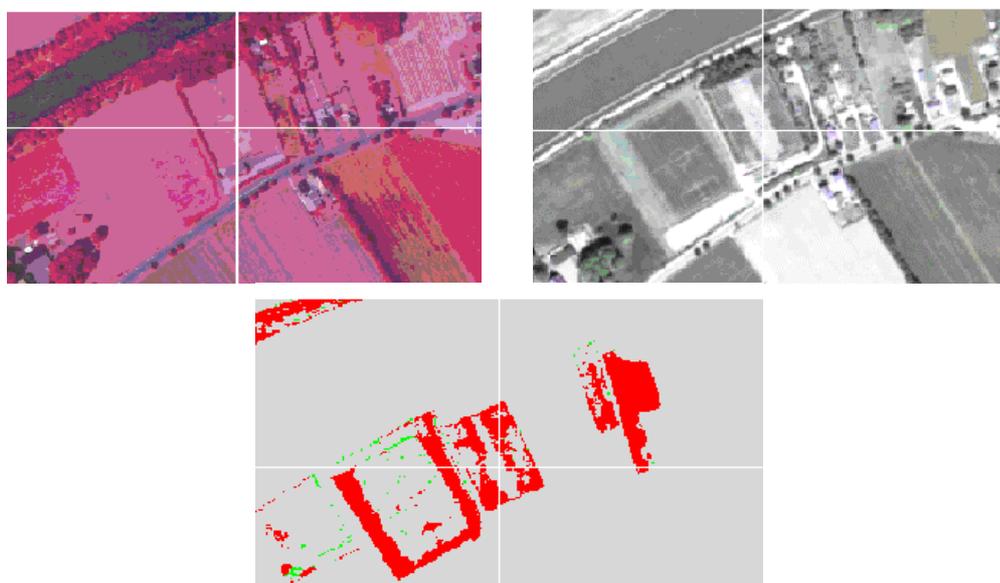


Abb. 5.37: Umnutzung von Grünlandflächen als Sportplätze: Abnutzungen und folglich Abnahme der Rasenflächen werden über rot gefärbte Flächen angezeigt (unten Mitte: Ergebnis der Veränderungsanalyse, das Fadenkreuz dient zur besseren Orientierung; screenshots).

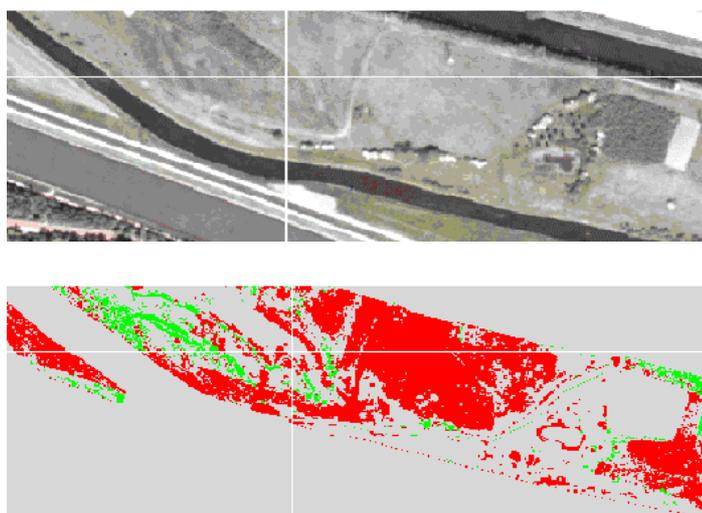


Abb. 5.38: Grünlandfläche mit Veränderungen, oben: Color-Luftbildmosaik 1990, unten im Veränderungsbild: sehr gut sichtbar für die rot gefärbten Bereiche die Abnahme der Vitalität bzw. des "Grünheitsgrades" der Vegetation für eine große Fläche im Bildzentrum (screenshots).

Eine Quantifizierung der Zu- oder Abnahme klassifizierter vegetationsbestandener Grünlandflächen zeigt keine gesicherten Ergebnisse. Die Ackerparzellen dieser Kategorie sind durch häufige Fruchtfolgegewechsel geprägt; die Kulturpflanzen zeigen verschiedene Wuchszyklen. Selbst der erfaßte Rückgang der Dichte der Vegetation für eine große Grünlandfläche im Nordosten des Bildausschnitts (vgl. Abb. 5.38) kann ohne Zusatzinformationen nicht definitiv erklärt werden.

Die Analyse vegetationsfreier Bereiche der Grünlandflächen bestätigt für Großteile der Veränderungsflächen die Ergebnisse der Veränderungsanalyse der vegetationsbestandenen Flächen. Die untersuchten Areale haben sich folglich mehrheitlich von vegetationsbestanden in vegetationsfrei gewandelt. Allerdings können aufgrund der unabhängigen Klassifikationsansätze für diese Unterklasse (vegetationsfrei) andere Informationen herausgearbeitet werden als mit dem vorherigen Ansatz (vgl. Abb. 5.39, 5.40). Dies wird im folgenden näher erläutert.

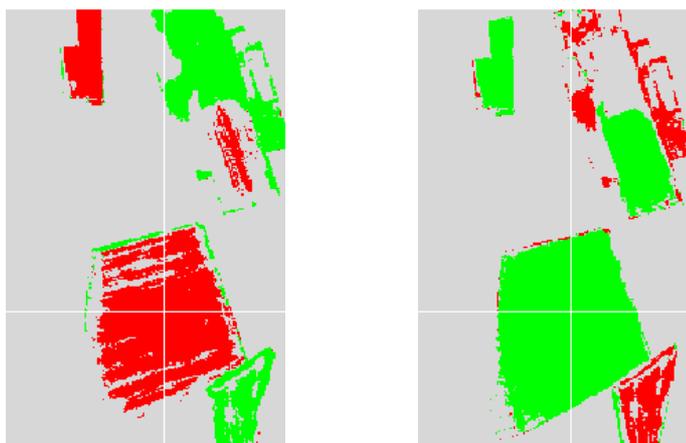


Abb. 5.39: Tendenziell zeigt die Veränderungsanalyse vegetationsfreier Flächen (links) die gleiche Art der Veränderung wie die Analyse der vegetationsbestandenen Flächen (rechts) an: rote Flächen deuten auf die Abnahme bzw. den Wegfall vegetationsloser Flächen hin (links), während grüne Flächen auf die Zunahme vegetationsverdeckter Areale hindeuten (rechts). Allerdings deutet die Diagnose links darauf hin, daß noch weitere Klassen Veränderungen erfahren haben, da einige Bereiche der überwiegend rotgefärbten Fläche links grau eingefärbt sind, während sie im Bild rechts nicht mehr auftreten, sondern als Flächenzuwachs für vegetationsbestandene Flächen ausgewiesen werden (das Fadenkreuz dient zur Orientierung; screenshots).

Die Abbildungen 5.39 und 5.40 dokumentieren, daß die Klasse „Übergang nicht vital-vital“ der Klassifikation des CIR-Luftbildmosaiks für die Aufnahme von 1990 ebenfalls als vollständig vegetationsbestanden eingestuft wird (vgl. Rekodierung Kap. 4.2).

Folglich kann z.B. ein direkter Vergleich der beiden Unterklassen „Übergang nicht vital-vital“ und „vegetationsverdeckt“ der Klassifikationen des CIR-Luftbildmosaiks und des Color-Luftbildmosaiks weitere Erkenntnisse über Veränderungen/Variationen innerhalb der Kategorie „Grünland“ für den Zeitraum von fünf Jahren liefern.

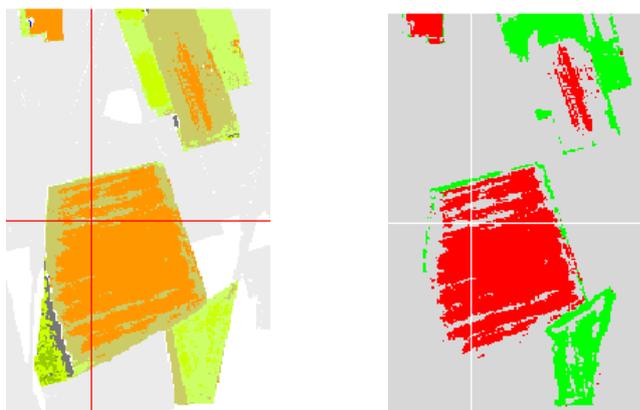


Abb. 5.40: Die Unterklasse „Übergang nicht vital-vital“ der Klassifikation des CIR-Luftbildmosaiks wird bei der Veränderungsanalyse der vegetationsfreien Flächen nicht berücksichtigt (olivgrün gefärbte Bereiche in dem klassifizierten Bild links; vgl. auch Abb. 5.39 links); bei der Analyse vegetationsbestandener Flächen allerdings werden diese Flächen mit einbezogen (Rekodierung), die Veränderungsanalyse zeigt eine Zunahme der vegetationsbestandenen Flächen für den Zeitraum von 1985 bis 1990 (vgl. Abb. 5.39). Die grau eingefärbten Teilflächen in der überwiegend rot gefärbten Fläche rechts lassen sich somit über die Einzelbildklassifikation des CIR-Luftbildmosaiks als Areale der Unterklasse „Übergang nicht vital-vital“ identifizieren (screenshots).

## (2) Kategorie „Wald: laubwalddominierte Flächen“

Da die Luftbildmosaike zu sehr unterschiedlichen Zeitpunkten der phänologischen Entwicklung der meisten Laubbaumarten aufgezeichnet wurden, nimmt die klassifizierte vegetationsbestandene Fläche erwartungsgemäß vom 25.07.1985 im Vergleich zum 05.05.1990 deutlich ab. Während der überwiegende Anteil der von der Analyse erfaßten Flächen bei starker „Marmorierung“ auf keine reale Veränderung hindeutet (s.o. Schattenwurf der Bäume), weisen flächendeckend rot oder grün gefärbte Bereiche auf deutliche Änderungen hin. Ein Beispiel hierfür ist die Umnutzung von Waldfläche in Ackerland in der Südwestecke des Bildausschnitts (vgl. Abb. 5.22). Über die Veränderungsanalyse wird hier die Zu- oder Abnahme erfaßter bestellter Ackerflächen aufgedeckt. Der Nutzungswechsel von Wald in Ackerflächen wird durch den direkten Vergleich der beiden Luftbilddatensätze verifiziert. Das eingangs erläuterte Verfahren ermöglicht hierzu eine systematische Untersuchung (kategorieübergreifende Veränderungsanalyse).

Die Analyse der Reflexion von durchscheinendem Boden und Baumholzanteil weist - genau wie die Untersuchung vegetationsloser Grünlandflächen - für große Bereiche Parallelitäten in der Diagnose auf. Die Ergebniskarte stellt eine sogenannte „Negativauswahl“ der walddominierten Areale dar. Flächen, die aufgrund leichter Lagefehler zwischen beiden Aufnahmezeitpunkten Veränderungen anzeigen, sind hiervon natürlich ausgenommen. Sie treten isoliert auf und sind nicht vergleichbar (vgl. unten, siehe Kap. 6).

### (3) Kategorie „Wald: nadelwalddominierte Flächen“

Diese Kategorie zeigt sowohl für die waldbestandenen wie auch für Bereiche mit durchscheinendem Boden- und Holzanteil viele Veränderungen auf. Areale, die homogen rot bzw. grün eingefärbt sind, treten relativ häufig auf und lassen auf tatsächliche Veränderungen schließen. Der erfaßte Rückgang nadelwalddominierter Flächen beläuft sich auf 45 ha, neu hinzugekommen sind 22 ha. Zumeist sind die Veränderungen als Kahlschlagflächen zu identifizieren. Sie liegen weit verstreut in den Waldarealen südwestlich von Bossendorf, nördlich des Forsthofes Haard und zugleich östlich der B 51. Kleinere Flächen sind entlang der A 52 östlich von Bossendorf bis nach Flaesheim gelegen. Durch die Analyse erfaßte Zuwächse vegetationsbestandener Bereiche sind nur vereinzelt zu verzeichnen, wie z.B. für die ehemalige Rodungsfläche, die östlich von Bossendorf in direkter Nachbarschaft zur A 52 liegt (vgl. Karte A.1, Anhang A). Hier ist innerhalb von fünf Jahren sukzessive Vegetation nachgewachsen (vgl. Abb. 5.41).

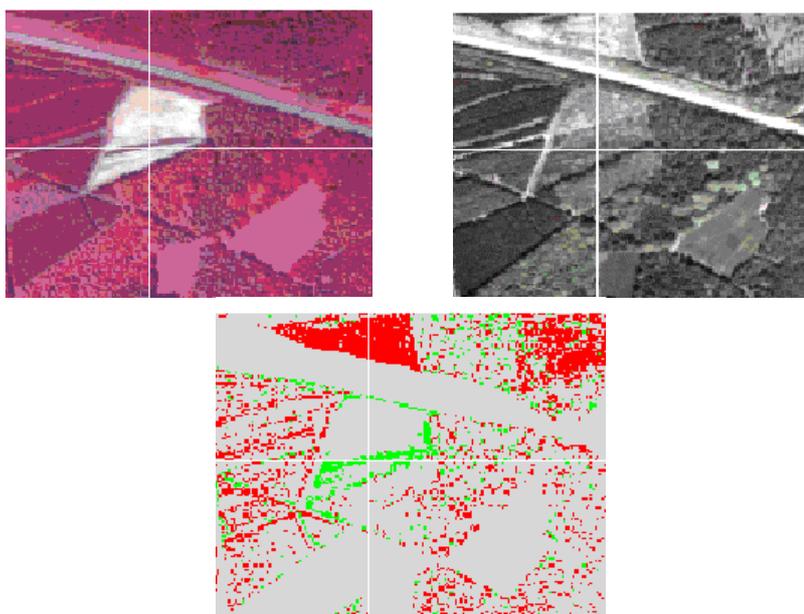


Abb. 5.41: Beispiel für den minimalen Flächenzuwachs vegetationsbestandener Waldflächen (grün gefärbt im Veränderungsbild unten; das Fadenkreuz dient zur Orientierung), Nördlich davon wird über eine homogen rot gefärbte Fläche ein Rodungsareal angezeigt (screenshots).

Die diagnostizierten Veränderungen der Flächen mit durchscheinendem Boden und Baumholzanteil für nadelwalddominierte Bereiche zeigen - wie schon zuvor die Untersuchungen für laubwalddominierte Bereiche - große Parallelitäten zu der Veränderungsanalyse der nadelwalddominierten Flächen. Das heißt, daß die Mehrzahl der Flächen entweder durch Rodung oder durch Aufforstung/ Vegetationszuwachs gekennzeichnet sind (Stichwort „Negativauswahl“). Auch hier wird die Klasse „Übergang nicht vital-vital“ im Zuge der Veränderungsanalyse nicht berücksichtigt, obwohl sie Flächenzuwächse im Rahmen der

Analyse vegetationsverdeckter Areale hervorruft. Weiterführende direkte Untersuchungen der beiden Klassen „Übergang nicht vital-vital“ und „nadelwalddominiert/vegetationsverdeckt“ könnten Informationen für ein Monitoring liefern (vgl. Abb. 5.39, 5.40).

#### 5.1.4.2 Veränderungsanalyse der Landsat TM-Szenen

Da die Satellitenbildszenen sensorbedingt stark abweichende Bildeigenschaften im Vergleich zu den Luftbildmosaiken aufweisen, sind die Veränderungsanalysen anders strukturiert. So wird für die Kategorie „Grünland“ nur untersucht, inwieweit vegetationsbestandene Flächen zu- oder abnehmen, denn

- aufgrund der relativ schlechten Bodenauflösung erscheinen weiterführende detaillierte Analysen kleinräumiger Variationen für die Unterklasse „Grünland: kahler Boden bzw. versiegelt“ nicht sinnvoll. Außerdem überlagern die sehr verschiedenen phänologischen Entwicklungsphasen mögliche Untersuchungen zu unterschiedlichen Vitalitätsgraden, die nicht durch die Jahreszeiten, sondern durch Trockenstress etc. bedingt sein könnten;
- zudem zeigen Grünlandflächen in der Regel nur zwei Arten der Veränderung auf: die Zu- oder Abnahme vegetationsverdeckter Areale bzw. die Ab- oder Zunahme vegetationsloser Bereiche;
- folglich werden über diese Analyse alle wesentlichen Veränderungen in ihrer flächenhaften Ausdehnung sowie ihrer Lage im Raum erfaßt.

Für die Kategorie „Wald“ werden entsprechend walddominierte und vegetationsfreie Areale untersucht. Ähnliche Voraussetzungen gelten auch für die Analyse der Kategorie „Gewässer“, da hier in der Regel nur ein Klassenwechsel von „Gewässer“ zu „kahlem Boden/Sandflächen“ und umgekehrt stattfindet (s.u.).

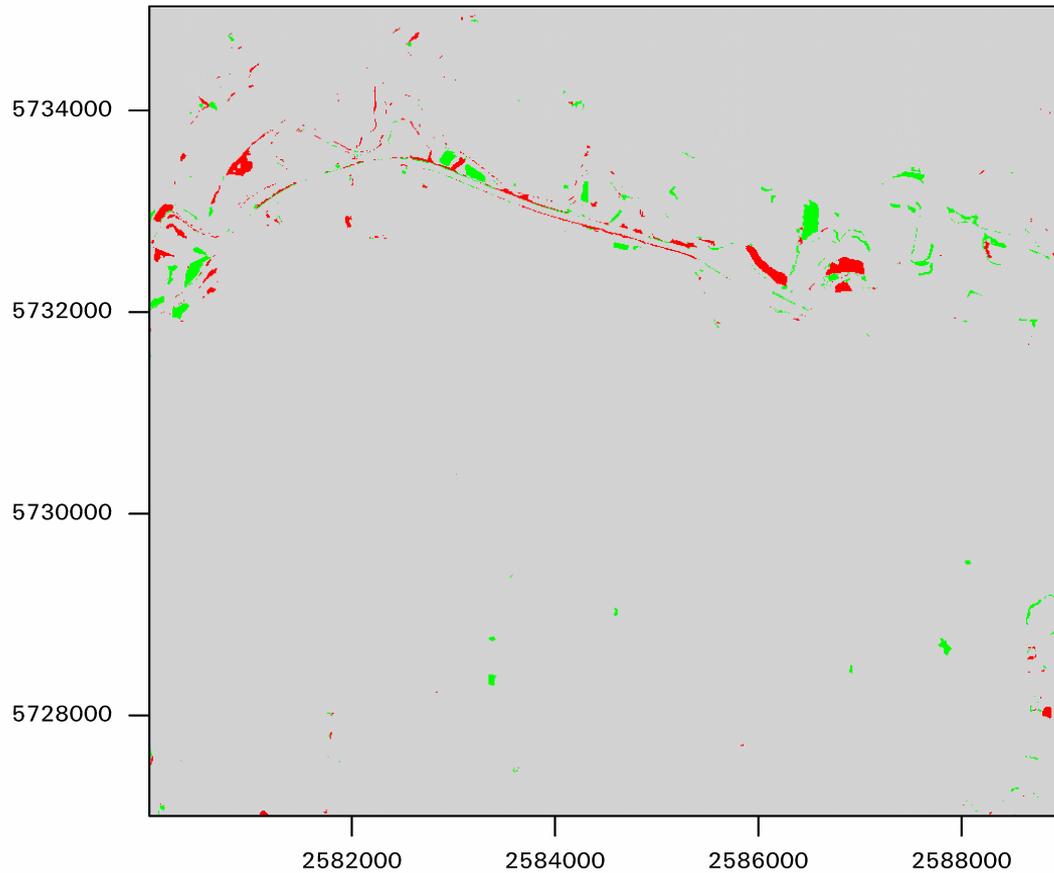
Im folgenden werden die Ergebnisse der Veränderungsanalysen - wie zuvor die Resultate der wissensbasierten Klassifikationen - kategorieweise vorgestellt. Dabei werden zunächst die Veränderungen vom 01.05.1986 bis zum 17.05.1986 und anschließend die Veränderungen zwischen dem 17.05.1986 und dem 02.07.1991 erläutert.

##### (1) Klasse „Grünland“:

###### *01.05.1986 bis 17.05.1986*

Die erfaßte Zu- oder Abnahme vegetationsbestandener Flächen dokumentiert auch hier, daß Teile der Grünlandflächen zu Ackerflächen umgewandelt worden sind (vgl. Veränderungsanalysen der Luftbildmosaike Kap. 5.1.4.1). Allerdings zeigt die Grünlandfläche, die sich südlich direkt an die Filterbecken der Wassergewinnungsanlage anschließt, eine deutliche Zunahme der klassifizierten Vegetation. Diese Variation scheint vor allem durch die phänologischen Entwicklungen des Grünlands zwischen den beiden Szenen bedingt zu sein (vgl. Abb. 5.42 und 5.38).

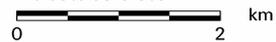
Karte 5.5 : Klasse Grünland: vegetationsbestanden: Veränderungsanalyse  
Datengrundlage: Landsat TM-Szenen vom 17.05.1986 und 02.07.1991



#### Legende

Klassenbezeichnung	Fläche (ha)
 Abnahme bzw. Wegfall der Fläche	40
 Zunahme der Fläche bzw. neu entstandene Fläche	42

#### Maßstabsleiste



Bearbeitung: Dipl.-Geographin Ch. Lechtenböcker (2000)

Datengrundlage: Landsat TM-Szenen vom 17.05.1986 und 02.07.1991, DSK, Abt. DG, Bottrop

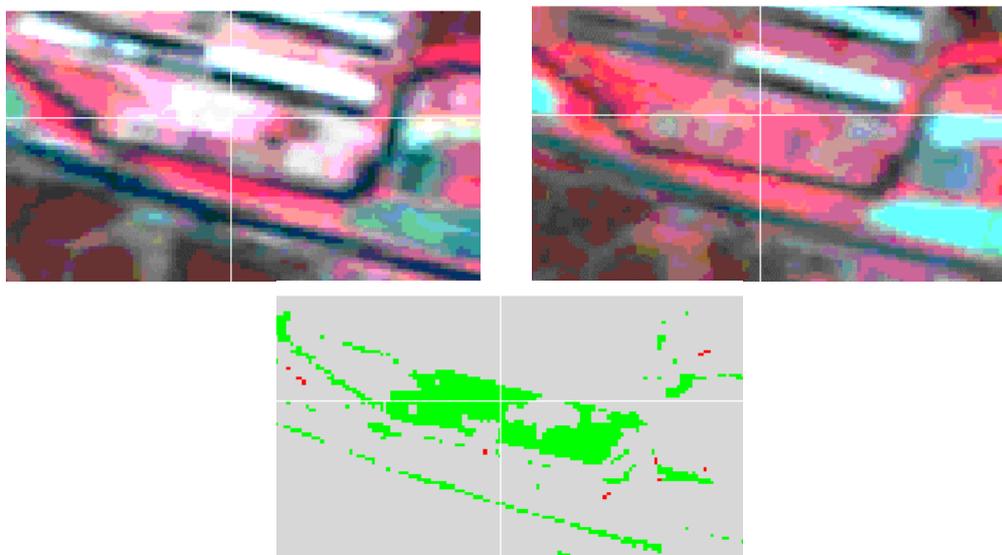


Abb. 5.42: Deutliche Zunahme der vegetationsverdeckten Bereiche der Kategorie "Grünland" vom 01.05.1986 (links oben) zum 17.05.1986 (rechts oben), dargestellt in der Veränderungsanalyse (grün gefärbte Bereiche im Veränderungsbild unten Mitte; screenshots).

#### *17.05.1986 bis 02.07.1991*

Die Veränderungsanalyse für diesen Zeitraum dokumentiert im wesentlichen, ob Ackerflächen zur Zeit der Aufnahmen bestellt, also vegetationsverdeckt, oder unbestellt, also vegetationsfrei waren. Diese Wechsel (Variationen) werden eindeutig angezeigt. Darüber hinaus werden für einige Teile der Lippe wie auch für eine lange Strecke des Kanals Verluste der klassifizierten vegetationsverdeckten Flächen aufgezeigt. Diese linienhaften Veränderungen sind in der Regel auf leichte Paßungenaugigkeiten der beiden Szenen zueinander zurückzuführen (vgl. Kap. 6). Dadurch, daß diese Kategorie auch ackerbaulich genutzte Parzellen umfaßt, kann die Flächenbilanzierung nur Tendenzen widerspiegeln; hier wären folglich nur „Momentanalysen“ der durch ackerbauliche Nutzung vegetationsverdeckten Areale möglich.

#### (1) Klasse „Wald: laubwalddominiert“

##### *01.05.1986 bis 17.05.1986*

Diese Analyse spiegelt die rasante phänologische Entwicklung der Laubbäume von Anfang bis Mitte Mai wider; die Entwicklung überlagert alle weiteren möglichen Veränderungen. Dadurch, daß weite Teile der Laubwaldflächen für den 01.05.1986 der Unterklasse „Übergang nicht vital-vital“ zugeordnet werden, verzeichnen die klassifizierten Waldflächen für Mitte Mai einen enormen Zuwachs von nahezu 2000 ha (vgl. Kap. 5.1.3). Eine Reduzierung der erfaßten Flächen kann für diesen Zeitraum demgegenüber nicht diagnostiziert werden. Dieses Phänomen wurde schon im Zuge der Ergebnisdarstellung der Klassifikationen näher erläutert, so daß an dieser Stelle auf weitere Details verzichtet wird (vgl. Kap. 5.1.3). Für Szenen mit derart unterschiedlichen Phänologien kann eine Veränderungsanalyse zukünftig nicht empfohlen werden.

*17.05.1986 bis 02.07.1991*

Auch für diesen Untersuchungszeitraum ist diese Kategorie durch die unterschiedlichen phänologischen Entwicklungsstadien stark fehlerbehaftet. Die einzelnen diagnostizierten Veränderungsflächen müßten im Detail mit den Satellitenbildszenen verglichen werden um festzustellen, ob es sich um vermeintliche oder tatsächliche Veränderungen handelt. Die Gründe sind häufig unterschiedliches Spektralverhalten aufgrund verschiedener Phänologien und dadurch provozierte „Fehl“klassifizierungen im Zuge der wissensbasierten Klassifikation. Diese Ergebnisse lassen sich für den Vergleich schlecht verwerten. Zudem verfälschen leichte Lagefehler zwischen beiden Aufnahmen und veränderte Grauwerte infolge der einfachen Pixelvervielfachung die Resultate (vgl. oben). Abbildung 5.43 zeigt, daß eine ehemalige als vegetationsfrei klassifizierte Fläche 1991 als vegetationsbestanden erfaßt wird. Mit Hilfe zusätzlicher Informationsquellen (die hier leider nicht zur Verfügung stehen) kann dann erforscht werden, ob die Fläche aufgeforstet wurde, ob es sich um eine vegetationsbestandene Brachfläche handelt oder ob diese Fläche ackerbaulich genutzt wird.

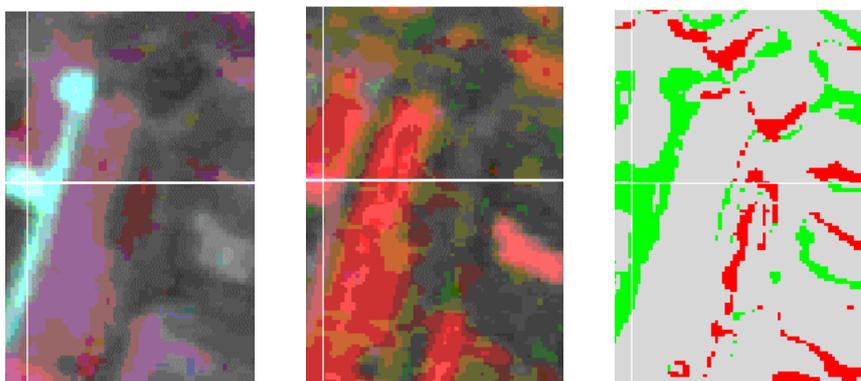


Abb. 5.43: Die vegetationsfreie Fläche (1986, links) zeigt für die Aufnahme von 1991 (Mitte) Vegetation an. Das belegt die Veränderungsanalyse (rechts, grün eingefärbte Fläche im Bereich des Fadenkreuzes; screenshots).

## (2) Klasse „Wald: nadelwalddominiert“

*01.05.1986 bis 17.05.1986*

Das Resultat für diese Analyse zeigt eine Abnahme der klassifizierten nadelwalddominierten Flächen an. Da jedoch Abholzungen bzw. Rodungen in dem Umfang für diesen kurzen Zeitraum nicht sehr wahrscheinlich sind, müssen andere Gründe vorliegen, die dieses Ergebnis hervorrufen. Dies kann zum einen an der Blüte der Nadelbäume liegen, die in der Regel Mitte Mai beginnt (DWD 1991, S. 51 ff.). Dadurch kommt es wegen des veränderten Reflexionsverhaltens der Nadelbäume zu etwas anderen Klassenzuweisungen und Ergebnissen (die wiederum den Veränderungsanalysen zugrunde liegen; vgl. Kap. 5.1.3). Darüber hinaus können abweichende Reflexionseigenschaften der TM-Szene vom 17.05.1986 infolge der Atmosphärenkorrektur dazu führen, daß die Nadelbäume schlechter spektral von anderen Objektgruppen isoliert und folglich schlechter über die Klassifizierung erfaßt werden können (s.o., Kap. 3.2).

Hinzu kommt, daß laub- und nadelwalddominierte Bereiche im Rahmen der Klassifikationen nur aufgrund ihrer unterschiedlichen Reflexionswerte im NIR voneinander getrennt werden können. Das heißt jedoch auch, daß für den 01.05.1986 und den 17.05.1986 durchaus diverse laubwalddominierte Flächen fälschlicherweise als Nadelwald klassifiziert werden, da diese Laubbäume im frühen Entwicklungsstadium ähnlich niedriges Spektralverhalten wie Nadelbäume aufweisen. Einzelne Laubbaumarten haben sich mit fortschreitender Jahreszeit soweit entwickelt, daß sie für Mitte Mai bereits ein gänzlich anderes Spektralverhalten im NIR als Anfang Mai und/oder als die Nadelwaldflächen aufweisen. Folglich nimmt die zuvor „künstlich“/fälschlicherweise als Nadelwaldfläche klassifizierte Flächensumme für den Untersuchungszeitraum „überproportional“ ab (vgl. ausführliche Fehlerdiskussion Kap. 6, Abb. 6.10, 6.11). Demzufolge zeigt auch die Analyse der nadelwalddominierten Flächen wie schon die Untersuchung der laubwalddominierten Areale vor allem die phänologischen Entwicklungsstadien der einzelnen Baumarten an; andere Entwicklungen werden dadurch so stark überlagert, daß sie kaum zu isolieren sind.

*17.05.1986 bis 02.07.1991*

Diese Analyse scheint durch die verfälschenden Einflüsse der phänologischen Stadien der Baumarten nicht mehr so sehr fehlerbehaftet zu sein wie die für den ersten Untersuchungszeitraum. Viele der Veränderungsflächen, die „Abnahme oder Wegfall“ signalisieren, zeigen wirklich Änderungen an. Dies sind in der Mehrzahl der Fälle Flächen, auf denen Rodungen/Kahlschlag stattgefunden haben. Diese Areale sind mit ca. 5 ha in der Regel recht klein und liegen in dem Waldgebiet weit verstreut (vgl. Abb. 5.44). Die weiteren Veränderungsflächen, insbesondere solche, die vermeintlich Flächenzuwachs signalisieren, beruhen zumeist auf Lageversätzen der Datensätze untereinander; in Kapitel 6 wird darauf näher eingegangen.

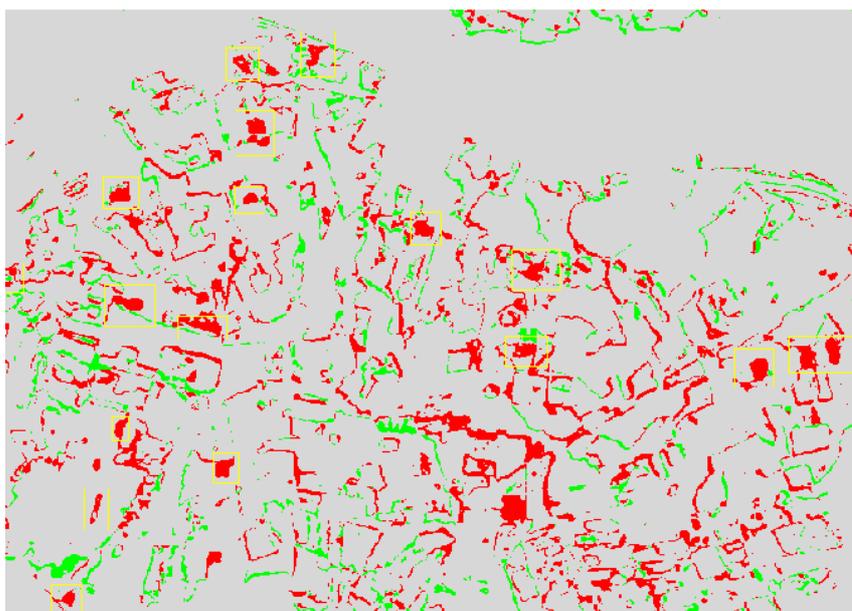


Abb. 5.44: Die über gelbe Boxen gekennzeichneten Veränderungsflächen (rot) weisen auf Kahlschlag- bzw. Rodungsflächen in nadelwalddominierten Bereichen hin (screenshot).

#### (4) Klasse „Wald: kahler Boden bzw. versiegelt“

*01.05.1986 bis 17.05.1986*

Das Problem, daß phänologische Stadien der Vegetation weitere Entwicklungen überdecken, besteht auch für die Veränderungsanalyse vegetationsfreier Flächen. Hierfür sind mehr Flächenabnahmen als Zuwächse erfaßt, da die Bäume zunehmend Flächen überwuchern. Hinzu kommt, daß entlang linienhafter Strukturen „falsche“, veränderte Grauwerte durch die einfache Pixelvervielfachung auftreten (vgl. Kap. 3.2.3). Das hat zur Folge, daß die Ergebnisse der Veränderungsanalyse für diese Areale durch fehlerbehaftete Klassifizierungen verfälscht werden (vgl. Kap. 6).

*17.05.1986 bis 02.07.1991*

Da auch dieser Analyse unabhängige Klassifikationen zu durchscheinendem kahlem Untergrund bzw. versiegelten Flächen zugrunde liegen, bildet sie keine komplementäre Karte zu vorangegangenen Ergebniskarten. Diese Analyse zeigt die Zu- oder Abnahme von Flächen, die als vegetationsfrei klassifiziert werden. Diese Flächen sind tatsächlich entweder vegetationsbestanden (Abnahme vegetationsloser Bereiche) oder vegetationsfrei (Zunahme dieser Flächen, Stichwort „Negativauswahl“). Es handelt sich dabei in der Regel um sehr kleine Flächen unter 5 ha Ausdehnung, die sehr verstreut liegen. Die Größe der Quantifizierungen sind zwar nicht zuverlässig, doch können über die Quantifizierungen Standorte von Veränderungen detailliert aufgespürt werden.

#### (5) Klasse „Gewässer“

In dieser Analyse werden Veränderungen nur für eine Teilfläche des gesamten Bildsegments der Kategorie „Gewässer“ dokumentiert. Die Untersuchungen beschränken sich auf die Uferzonen des Baggersees. Dieser See wird beispielhaft für Wasserflächen untersucht, die möglichen Veränderungen unterliegen. Da jedoch die meisten Gewässer im Untersuchungsraum keine nachweisbaren Veränderungen aufweisen können, da sie kanalisiert oder eingedeicht bzw. die Ufer befestigt sind, wird der Baggersee, dessen Veränderungen der Uferlinien bereits in Kapitel 5.1.1.2 angesprochen worden sind, untersucht (vgl. Abb. 5.11). Zudem sind die Grauwerte des Lippeverlaufs infolge der einfachen Pixelvervielfachung stark fehlerbehaftet, so daß eine Veränderungsanalyse hier nicht sinnvoll erscheint (vgl. Kap. 5.1.1.2, 6).

*01.05.1986 bis 17.05.1986*

Die Analyse zeigt für diesen Zeitraum zunächst keine deutlichen Veränderungen auf. Die linienhaften Strukturen der Veränderungsbereiche (grün, rot) deuten eher auf Lageungenauigkeiten zwischen den beiden Szenen hin.

*17.05.1986 bis 02.07.1991*

Diese Veränderungsanalyse zeigt sehr deutlich die Verlagerung der Uferlinie nach Südwesten an. Die als weggefallene Wasserflächen erfaßten Bereiche am Nordrand des Bagger-

sees sind 1991 durch Sandflächen dominiert. Im Süden hat sich die Wasserfläche weiter in das Waldareal vorgeschoben und zugleich den Sandstrand und die Vegetation verdrängt. Obwohl die Flächenbilanz mit minus 5 ha und plus 6 ha Fläche ausgeglichen erscheint, sind die Veränderungen in der Karte sehr deutlich, und sie können sehr gut verortet werden.

Insgesamt dokumentieren die Untersuchungen, daß Veränderungen immer dann angezeigt werden, wenn die folgenden Voraussetzungen gegeben sind:

*für alle Fernerkundungsdatensätze:*

- Die geocodierten Aufnahmen weisen leichte Lagefehler untereinander auf, linienhafte Konturen an Nutzungsgrenzen entstehen, die vermeintliche Veränderungen dokumentieren (vgl. Kap. 6).
- Veränderungen haben tatsächlich stattgefunden.

*für die Luftbildmosaike:*

- Schattensäume an Nutzungsgrenzen fallen in dem einen Mosaik anders aus als in dem anderen.
- Die Datensätze weisen sehr unterschiedliche Spektraleigenschaften auf. Sogenannte Abnutzungserscheinungen treten z.B. innerhalb von Grünlandflächen auf. Sie rufen verschiedene Grade von Grün in dem Color-Luftbildmosaik hervor. Im CIR-Luftbildmosaik hingegen werden diese Abnutzungen im NIR-Kanal über andere DNs repräsentiert. Unterschiedliche Klassenzuweisungen können auftreten; die Veränderungsanalyse ist folglich fehlerbehaftet (vgl. Kap. 6).

*für die Satellitenbildszenen:*

- Grauwertveränderungen infolge der einfachen Pixelvervielfachung „täuschen“ Veränderungen „vor“. Dies gilt insbesondere für linienhafte Strukturen, die im Zuge der Pixelvervielfachung harmonisierte DNs aufweisen (vgl. Kap. 3.2, 5.1.3, 6).

Trotz der genannten Fehlereinflüsse zeichnet sich die vorgestellte Methodik der Veränderungsanalyse vor allem durch folgende Vorteile aus:

- Veränderungen können im Raum verortet werden (vgl. Klasse „Gewässer“).
- Die homogen texturierten Flächen können individuell auf Flächengrößen untersucht werden (also Flächensummen je Klasse/Kategorie und Größe je Fläche).
- Hinzu kommt die Möglichkeit, aufbauend klassen- oder kategorieübergreifende Analysen durchzuführen.

## 5.2 Handlungsempfehlungen für die Praxis

Bisher sind keine Hilfestellungen für die systematische praxisorientierte Analyse von Fernerkundungsdaten im Rahmen von Umweltmonitoringverfahren veröffentlicht worden. Durch die in dieser Arbeit entwickelten Methoden und Verfahren, die in Abbildung 5.45 kondensiert aufgeführt sind, wird die Auswertung von Fernerkundungsdaten für Büros und Kommunen effizient gestaltet (Detailaspekte und -fragen werden in einzelnen Kapiteln behandelt, auf die verwiesen wird).

Da die Ergebnisse der Analysen für weitere Arbeiten im Zuge eines Umweltmonitorings genutzt werden, sind die Auswertungen in einem frühen Stadium des Umweltmonitoringverfahrens durchzuführen (vgl. Abb. 5.45).

1. Zu Anfang der Arbeiten muß geklärt werden, welche Größe der Untersuchungsraum hat und welche Untersuchungs- und Kartenmaßstäbe idealerweise angestrebt werden sollen. Zudem sollten die gewünschten Datenqualitäten sowie die Beobachtungsraten bestimmt werden. Diese Entscheidungen hängen zum einen sehr stark vom Auftragsziel ab; zum anderen beeinflußt die Verfügbarkeit der Daten deutlich die Maßstabsauswahl, die Wiederholungsraten sowie die Zusammenstellung der Fernerkundungsdaten (vgl. Kap. 2).
- 2.a) Danach beginnt die Recherche nach geeigneten Fernerkundungs- und Kollateraldaten. Für Luftbilddaten sind Anfragen an einschlägige Institutionen/Firmen, Regionalverbände oder Landesvermessungsämter zu richten; für diese Arbeit wurden Luftbilddaten vom KVR und vom Lippeverband verwendet (der Untersuchungsraum liegt in NRW). Mit Hilfe der Bildflugübersichten des zuständigen Landesvermessungsamtes können diese Daten systematisch recherchiert werden. Falls diese Recherchen erfolglos bleiben, können Luftbildbefliegungen bei entsprechenden Firmen der Region in Auftrag gegeben werden. Dadurch wird gewährleistet, daß die Kosten der Befliegungen nicht durch lange Anflüge zum Untersuchungsraum in die Höhe getrieben werden, da der Heimathafen der Flugzeuge nah ist. In diesem Zusammenhang wird eine Internetrecherche empfohlen, da die Recherchen einen schnellen Zugriff auf aktuelle Leistungsprofile von Datenanbietern erlauben. Dies gilt auch für die Recherche von Satellitenbilddaten. Zugleich wird empfohlen, Detailfragen zur Bestellung der Daten telefonisch zu klären (z.B. Lieferzeiten, Rabatte; Tab. 5.30 gibt einen ersten Überblick ohne Anspruch auf Vollständigkeit).
- 2.b) Kollateraldaten wie Karten bzw. Kartenwerke z.B. zu Geologie, Vegetation, Flächennutzung oder zu Grundwasserflurabständen sind vorzugsweise bei den in Tabelle 5.30 genannten Stellen nachzufragen; diese Daten liegen zum Teil auch digital vor. Je nach Projektziel müssen eventuell auch DGMs, ATKIS- bzw. digitale DGK5-Daten u.ä. mit in die Analysen einbezogen werden.

Tab. 5.30: Internetadressen zur Recherche von Fernerkundungs- und Kollateraldaten

Internetadresse	Datenmaterial
fwserver1.ifag.de	Fernerkundungs- und Kollateraldaten sowie weitere Links/Kontakte
www.eurosense.com	Fernerkundungs- und Kollateraldaten
www.euromap.de	Fernerkundungs- und Kollateraldaten
www.spaceimaging.com	Fernerkundungs- und Kollateraldaten
www.esrin.esa.it	Fernerkundungs- und Kollateraldaten
www.eds.dofn.de	Fernerkundungs- und Kollateraldaten
www.dlr.de	Fernerkundungs- und Kollateraldaten sowie weitere Links/Kontakte
http:isis.dlr.de	Fernerkundungs- und Kollateraldaten
www.lverma.nrw.de	Fernerkundungs- und Kollateraldaten sowie weitere Links/Kontakte
www.aerowest.de	Fernerkundungs- und Kollateraldaten, v.a. DGM u.ä.
www.hansaluftbild.de	Fernerkundungs- und Kollateraldaten, v.a. DGM u.ä.

- 3.a) Nachdem die Recherche beendet ist, werden die Fernerkundungsdaten für die Analysen vorbereitet, das heißt, sie werden vorprozessiert (vgl. Kap. 3). Analoge Luftbilddaten sind zunächst in digitale Datensätze umzuwandeln (z.B. Scanservice: [www.geosystems.de/Scanservice](http://www.geosystems.de/Scanservice)). Danach müssen die Luftbilder geocodiert und mosaikiert werden. Optional ist die Detailschärfe verschiedener Luftbilddatensätze über die einfache Pixelvervielfachung zu verbessern bzw. anzupassen. Lösungsansätze für eventuell auftretende Probleme beim Mosaikieren sind im Kapitel 3.1 nachzuschlagen.
- 3.b) Satellitenbilddaten sind zunächst von Atmosphäreneinflüssen zu bereinigen, bevor sie geocodiert werden. Auch hier ist die Optimierung der Detailerkennbarkeit bzw. die Anpassung der Pixelgrößen verschiedener Sensordaten durch die Pixelvervielfachung zu empfehlen (je nach Anforderungen; vgl. Kap. 3.2).
4. In einem nächsten Arbeitsschritt werden die Eingangsdaten für die wissensbasierten Klassifikationen zusammengestellt. Hierzu müssen die Daten gegebenenfalls vorbereitet werden, indem z.B. Bildsegmente digitalisiert, Indexbilder erstellt oder DGMs angepaßt werden (vgl. Kap. 4.2).
- 5.a) Danach erfolgen die datensatzorientierten wissensbasierten Einzelbildklassifikationen. Empfohlen wird dabei die dem Auftragsziel angepaßte Nutzung der in dieser Arbeit entwickelten Klassifikationsdesigns. Falls dies aufgrund der stark abweichenden Fragestellungen oder Datenqualitäten nicht möglich ist, müssen die Designs durch ein empirisch-iteratives Vorgehen für die Datensätze neu generiert werden (vgl. Kap. 4.2, 5.1.2).
- 5.b) Aufbauend auf den unabhängig durchgeführten Einzelbildklassifikationen können in einem weiteren Arbeitsschritt die Veränderungsanalysen durchgeführt werden. Je nach spektralen Eigenschaften der zu vergleichenden Datensätze müssen die klassifizierten Daten zunächst eventuell rekodiert werden (vgl. Kap. 4.2, 5.1.4). Unter ERDAS Imagine erfolgt die „change detection“ durch die - in dieser Arbeit modifizierte - Nutzung des gleichnamigen Moduls. Die Ergebnisse ermöglichen nicht nur eine Quantifizierung der Veränderungen, sondern zudem eine Verortung der Veränderungen.
- 5.c) Im Anschluß daran werden die Ergebnisse der Einzelbildklassifikationen und der aufbauenden Veränderungsanalysen evaluiert, um die Aussagekraft für die weiteren Monitoringarbeiten bewerten zu können (vgl. Kap. 6).

6. Abschließend werden die Ergebnisse für die Weiterverarbeitung aufbereitet. Sie können zum einen in Form von analogen oder digitalen Karten bzw. Kartenwerken präsentiert werden. Zum anderen können die Resultate für weitere rechnergestützte Arbeiten in anderen Programmen in den entsprechenden Dateiformaten bereitgestellt werden.

Die vorgestellten Handlungsanweisungen bieten diverse Vorteile wie

- die Hilfestellung bzw. Arbeitsanleitung nicht nur für Fachleute, sondern auch für fachfernere Nutzer,
- die hohe Flexibilität bei der Modifikation einzelner Arbeitsschritte,
- die sehr leichte Handhabung des wissensbasierten Klassifikators und der Veränderungsanalyse für fachfernere Nutzer.

Zwar wurde für diese Arbeit die Software ERDAS Imagine benutzt, doch kann davon ausgegangen werden, daß auch andere kommerzielle Softwarepakete diese Arbeits- und Analysetechniken anbieten. So sind die Handlungsempfehlungen nicht an eine spezielle Software gekoppelt, sondern - unter entsprechenden Modifikationen - allgemeingültig.

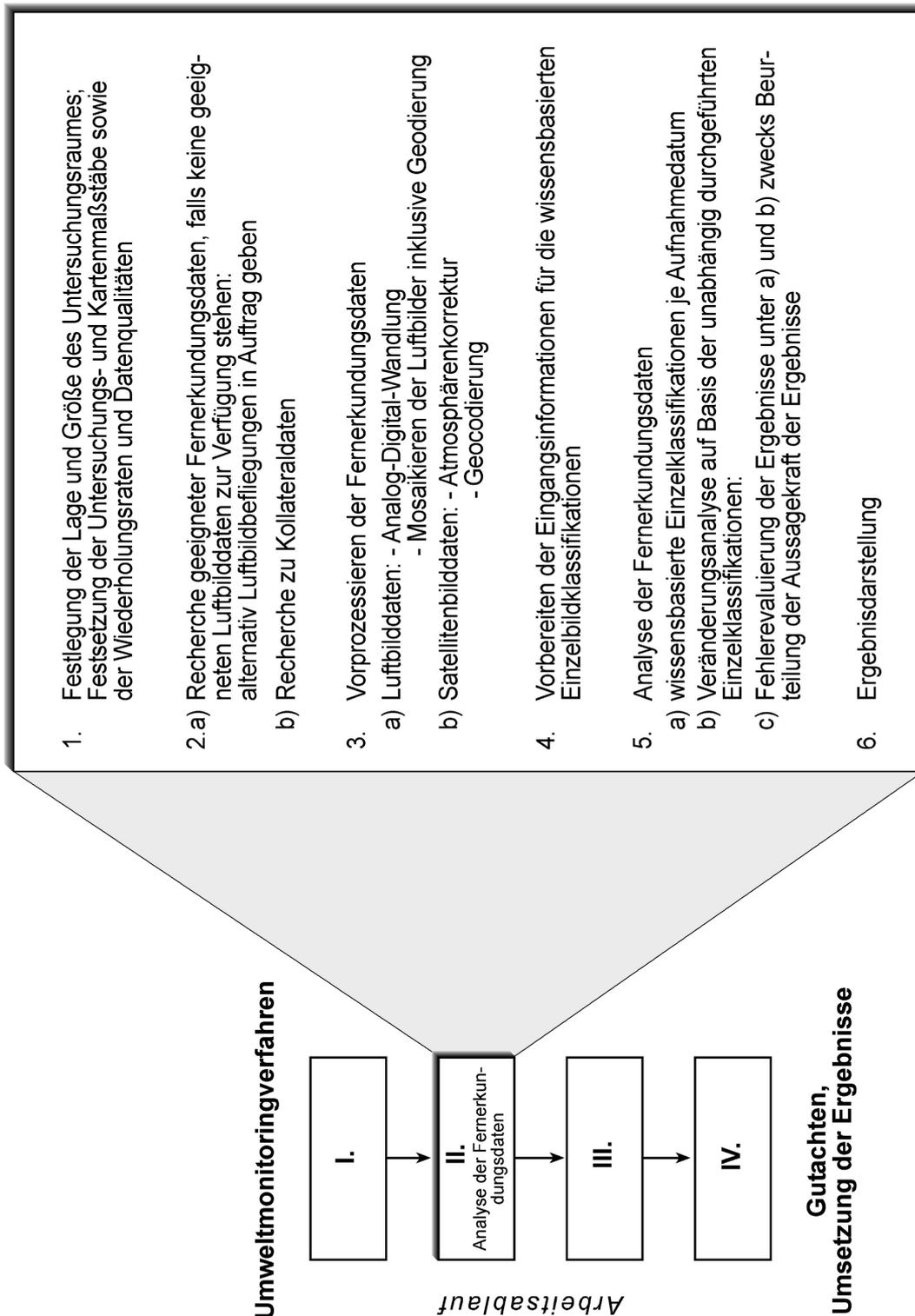


Abb. 5.45: Handlungsempfehlungen für den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringverfahren

## 6 Fehlerdiskussion

Teile der Fehlerdiskussion sind bereits in Kapitel 5.1 geführt worden (z.B. zu ATKIS- und DGK5-Daten). Die Klassifikatordesigns werden dagegen über die Klassifikationsergebnisse mit in die Bewertung und Diskussion einbezogen. Im Mittelpunkt der folgenden Fehlerdiskussion stehen daher die Ergebnisse der wissensbasierten Klassifikationen.

Aufgabe der Fehlerdiskussion im Anschluß an eine klassische Klassifikation ist es zu prüfen, ob und inwieweit die klassifizierten Ergebnisse der Realität entsprechen (vgl. CONGALTON 1994, S. 3 ff. bzw. das gesamte Kompendium von FENSTERMAKER 1994). Dabei werden die aufgetretenen Fehler erörtert, gegebenenfalls systematisiert, und es wird versucht, Lösungsmöglichkeiten zu eröffnen.

In dieser Arbeit wird jedoch der Ansatz der wissensbasierten Klassifikation genutzt, der sich wesentlich von konventionellen Klassifikationsansätzen unterscheidet: die Klassenzuweisungen erfolgen nicht durch Zuweisungswahrscheinlichkeiten, sondern mit 100 % Klassifikationsgenauigkeit (Konfidenzwert von 100 %) auf Basis der Eingangsvariablen. Ein „accuracy assessment“, eine Genauigkeitskontrolle im klassischen Sinn, ist daher in dieser Arbeit nicht durchzuführen.

Allerdings treten auch bei dem wissensbasierten Klassifikationsansatz Fehler auf, die im folgenden systematisiert werden. Für die verschiedenen Fehlerfälle werden Beispiele vorgestellt, um die Sachverhalte exemplarisch zu erläutern. Die vorgestellten Fehlerarten treten in den Einzelklassifikationen in unterschiedlichen Häufigkeiten (quantitativ) auf, wobei im Kern jeweils die gleichen Fehlertypen zugrunde liegen. Die dokumentierten Beispiele sollen es dem Leser ermöglichen, die aufgetretenen Fehler den einzelnen Fehlertypen zuzuordnen.

Hauptfehlerquellen sind dabei eindeutig die wissensbasierten Klassifikationsansätze und nicht die Veränderungsanalysen. Da die Einzelbildklassifikationen den Veränderungsanalysen zugrunde liegen, pflanzen sich die Fehler fort; zum Teil werden Fehler und deren Ursachen erst durch die Ergebnisbilder der Veränderungsanalysen aufgedeckt.

Im einzelnen konzentriert sich die Fehlerdiskussion auf vier Aspekte:

- a) Fehler/Verfälschungen, die durch die Datenvorprozessierungen (Atmosphärenkorrektur, Geocodierung) induziert sind;
- b) Fehler/Verfälschungen, die durch die Ausgrenzung von Pixeln bei Einhaltung des Konfidenzwertes von 100 % auftreten;
- c) Fehler/Verfälschungen, die durch unzureichende spektrale Separabilität von Objekten auftreten;
- d) sonstige Fehlereinflüsse.

Teilweise mag die Trennung der einzelnen Fehlertypen künstlich erscheinen, und bis zu einem gewissen Grad ist sie es auch. Dennoch wird sie weiterverfolgt, um einen strukturierten Überblick gewährleisten zu können.

Zu a) Fehler/Verfälschungen, die durch die Datenvorprozessierungen induziert sind

Abbildung 6.1 verdeutlicht eine erste Fehlerquelle im Zuge der Datenvorprozessierung sowie deren Auswirkungen.

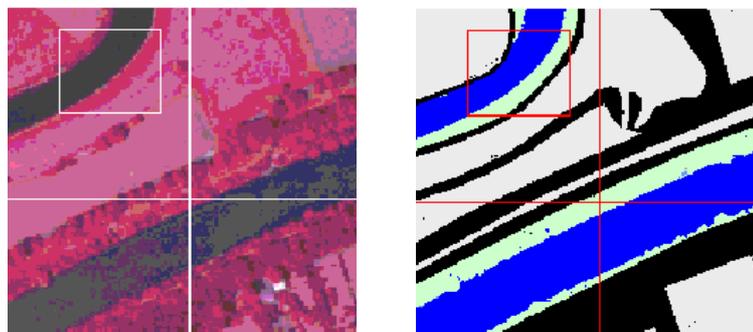


Abb. 6.1: „Mehr“-Klassifizierungen von Vegetation infolge von Paßungenauigkeiten zwischen der Maske für die Kategorie „Wasserflächen“ und dem CIR-Luftbildmosaik (das Fadenkreuz und die Suchbox dienen zur besseren Orientierung; graue bzw. schwarz gefärbte Bereiche im klassifizierten Bild rechts sind nicht klassifiziert bzw. nicht definiert; screenshots).

Hier werden Lagefehler bzw. Paßungenauigkeiten von Fernerkundungsdatensätzen - hier das CIR-Luftbildmosaik - zu den Masken aufgedeckt. In diesem Fall wird für die Kategorie „Wasserflächen“ infolge der Paßungenauigkeiten zuviel Fläche als Vegetation klassifiziert; die Quantifizierungen sind entsprechend fehlerbehaftet.

Abbildung 6.2 verdeutlicht einen weiteren Unterfall von Lagefehlern/Paßungenauigkeiten, dessen Auswirkungen im Rahmen der Veränderungsanalyse deutlich werden. Dieser Fehler wird durch Lageungenauigkeiten der beiden Luftbildmosaike zueinander hervorgerufen. Möglicherweise fällt er im Zuge der vergleichenden Betrachtung der Einzelbildklassifikationen nicht auf. Erst die Veränderungsanalyse macht den Fehler sichtbar und verortbar. Zugleich läßt sich der Flächenanteil, der zu vermeintlichem Flächenrückgang führt, quantifizieren.

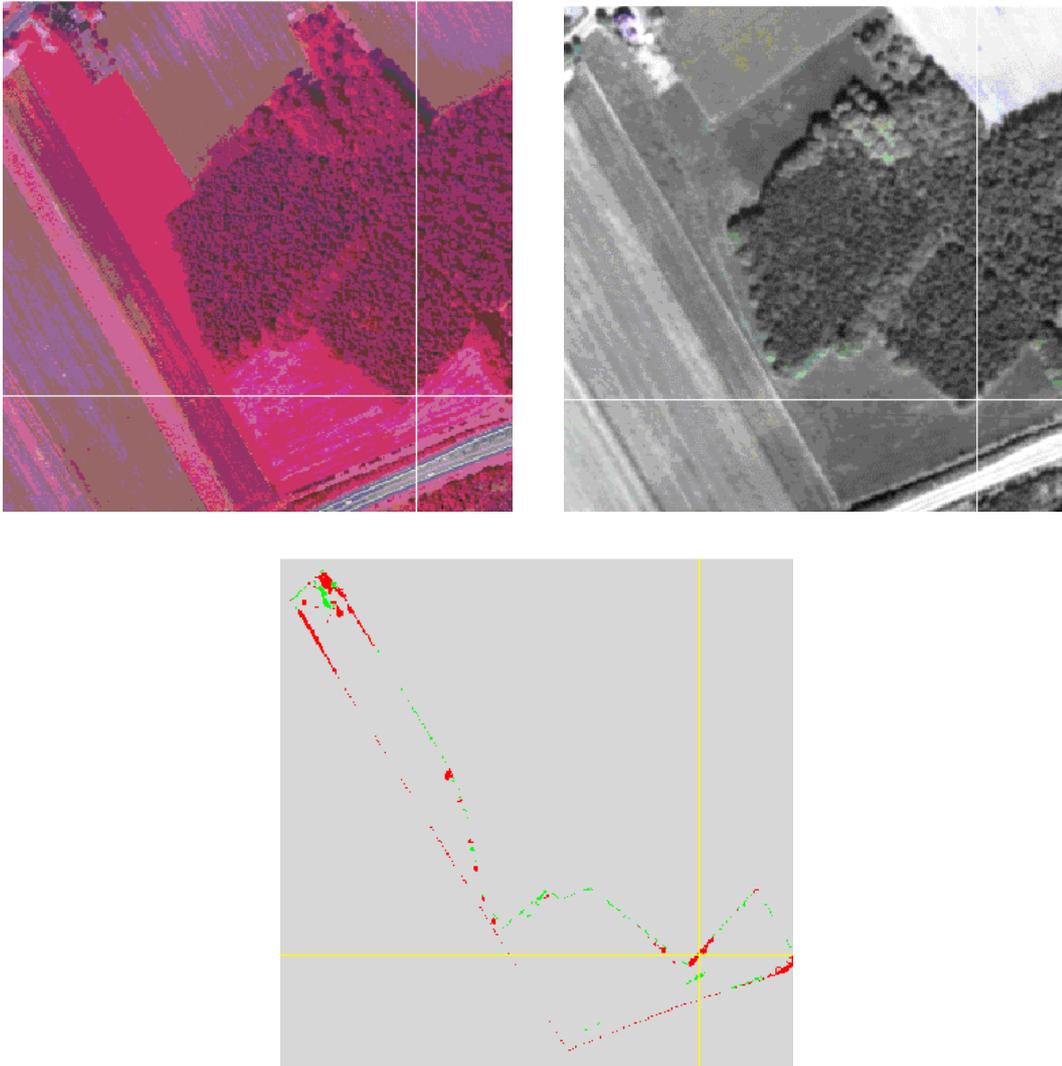


Abb. 6.2: Beispiel für die „Saumbildung“ im Zuge der Veränderungsanalyse. Der Saum entsteht durch leichte Lageabweichungen der beiden Luftbildmosaiken zueinander. Im klassifizierten Bild unten wird dies durch die linienhafte Struktur der rot und grün gefärbten Veränderungsbereiche für die Analyse der vegetationsbestandenen Grünlandflächen deutlich. Es kommt zu einer vermeintlichen Abnahme der Flächenausdehnung (rote Bereiche; screenshots).

Abbildung 6.3 veranschaulicht den nächsten Unterfall infolge der durch die Datenvorprozessierung bedingten Klassifizierungsfehler.

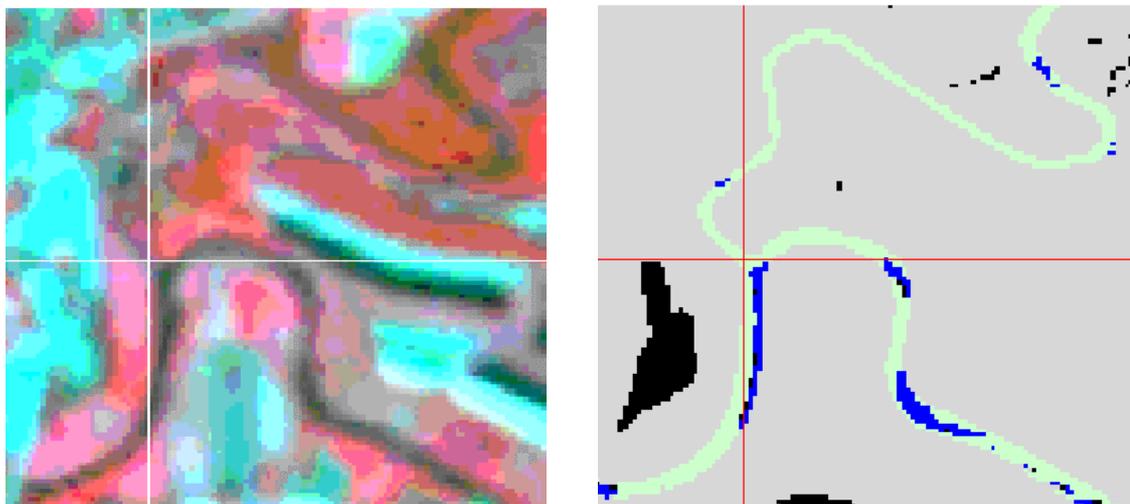


Abb. 6.3: Fehlklassifizierungen durch Grauwertveränderungen im Rahmen der einfachen Pixelvervielfachung für die Kategorie „Gewässer“: grün gefärbte Bereiche im Lippeverlauf zeigen vermeintlich vegetationsverdeckte Flächen an (z.T. gepaart mit Lageabweichungen zwischen Maske und Datensatz; screenshots).

Als Fehlerquelle liegt hier die Geocodierung in Kombination mit der einfachen Pixelvervielfachung zur Optimierung der Detailschärfe zugrunde. Wie bereits in Kapitel 5.1 angedeutet, führt die Vervielfachung zu veränderten, geglätteten Grauwerten. Dies hat für linienhafte Objekte wie die Lippe zur Folge, daß die Grauwerte im NIR häufig derart verändert sind, daß sie über den Klassifikationsansatz als vegetationsverdeckt eingestuft werden. Abbildung 6.4 verdeutlicht zudem die Auswirkungen der veränderten Grauwerte auf die Veränderungsanalyse.

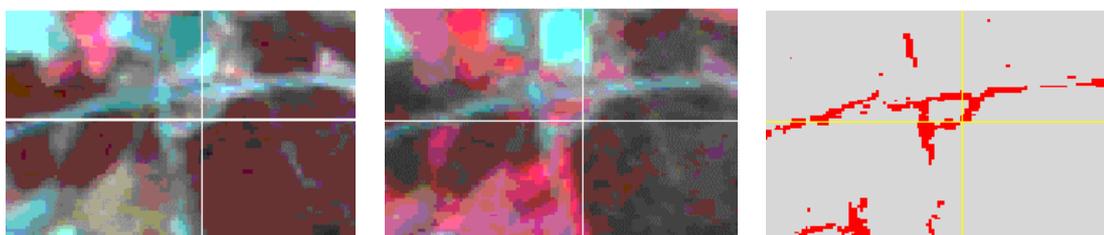


Abb. 6.4: Veränderungsanalyse der vegetationsfreien Waldflächen für die TM-Szenen vom 01.05.1986 und 17.05.1986. Fälschlicherweise wird eine Abnahme (rot im Veränderungsbild rechts) der klassifizierten vegetationsfreien Bereiche für die Umgebung der Autobahnabfahrt diagnostiziert. Die scheinbare Veränderung wird durch die harmonisierten Intensitätswerte der Szene vom 17.05.1986 hervorgerufen. Die Vegetation ist zu diesem Zeitpunkt deutlich vitaler als Anfang Mai. Ihr Einfluß auf die Grauwertveränderungen im Zuge der Pixelvervielfachung ist somit größer (screenshots).

Abbildung 6.4 zeigt noch eine weitere Fehlerquelle für die Reflexion der Straßenflächen: die Atmosphärenkorrektur. Sie kann - gerade auch für die Szene vom 17.05.1986 - nicht alle Atmosphäreinflüsse beseitigen, so daß Wasser- und Straßenflächen nach wie vor relativ hohe NIR-Reflexionen zeigen. Dies wird auch im NDVI-Bild der gleichen Szene für den Baggersee recht deutlich, da er stellenweise relativ hohe NDVI-Werte anzeigt.

Zu b) Fehler/Verfälschungen, die durch die Ausgrenzung von Pixeln bei Einhaltung des Konfidenzwertes von 100 % auftreten

Um zuverlässige Klassifikationsergebnisse zu erlangen, werden die Konfidenzwerte für die Gültigkeit der Eingangsvariablen auf 100 % festgesetzt. Diese Bedingung wird jedoch nicht von allen Pixeln, die einer vordefinierten Klasse zugerechnet werden müßten, erfüllt. Diese Pixel weisen gänzlich andere Spektraleigenschaften auf, die für die Definition der Eingangsvariablen nicht zu systematisieren und zu erfassen sind; es handelt sich hier um Ausreißer. Gleichzeitig sind diese Pixel aber auch nicht über andere Klassen erfaßbar (vgl. Fall c). Demzufolge werden diese Pixel bei der Klassifikation ausgegrenzt, sie fallen heraus. Damit die Mehrheit der Pixel einer vordefinierten Klasse über die Konditionen erfaßt werden können, wird der Kompromiß eingegangen, daß einige wenige Pixel von der Klassifikation ausgegrenzt bleiben. Würde man die Konditionen entsprechend verändern, um auch die Ausreißer zu integrieren, so zeichneten sich die Ergebnisse vorwiegend durch Fehler statt durch zuverlässige Aussagen aus; die Resultate wären unbrauchbar. Abbildung 6.5 verdeutlicht den Ausgrenzungstatbestand.

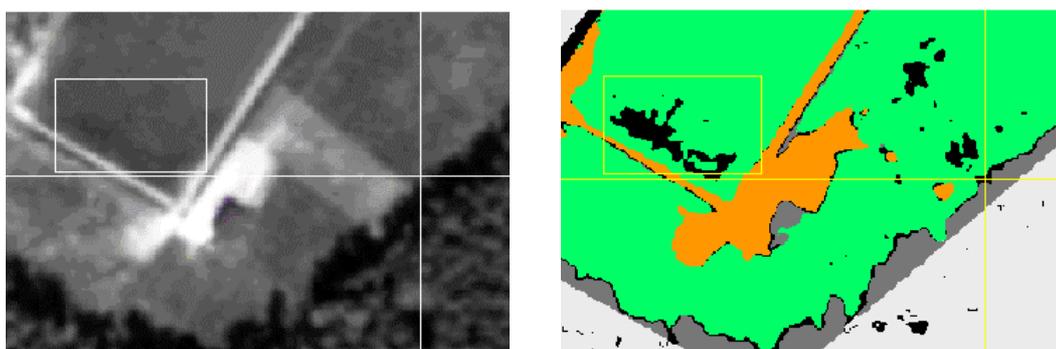


Abb. 6.5: Schattensäume und kräftig grün reflektierende Bereiche der Kategorie „Grünland“ für das Color-Luftbildmosaik werden über die Klassifikationsansätze z.T. nicht erfaßt (klassifiziertes Bild rechts: schwarze Bereiche, gekennzeichnet durch Suchbox und Fadenkreuz; screenshots).

Für dieses Beispiel sind die DN-Werte im Rot, Grün und Blau sowie der RG-Indexwert entscheidende Faktoren. Über die Kombination der Grenzwerte können vegetationsverdeckte Grünlandflächen von verschatteten Arealen getrennt werden. Da für die nicht klassifizierten Bereiche (schwarze Flächen) die DN-Werte der einzelnen Pixel jedoch für die Unterklasse „Grünland“ unter 70 im Rot liegen, werden sie nicht dieser Klasse zugeordnet.

Gleichzeitig liegen die Intensitätswerte im Grün und Blau über dem Grenzwert 100, so daß die Pixel auch nicht der Klasse „verschattete Bereiche (1)“ zugeschlagen werden. Die Pixel können außerdem aufgrund ihrer sehr kleinen Indexwerte nicht den beiden verbleibenden Klassen zugeordnet werden. Folglich werden sie nicht klassifiziert.

Zu c) Fehler/Verfälschungen, die durch unzureichende spektrale Separabilität von Objekten auftreten

Abbildung 6.6 verdeutlicht das Grundphänomen. Das Beispiel zeigt, daß Teile der Nadelwald- und Ackerflächen über die Konditionen der Klasse „verschattete Bereiche“ erfaßt und bei einem Konfidenzwert von 100 % dieser Klasse zugeschlagen werden. Diese Pixel können - unter Beibehaltung des unter b) erläuterten Kompromißes - nicht über die Konditionen der Klasse, zu der sie als Objekte zählen, erfaßt werden. Die Konsequenzen für eine Flächenstatistik bzw. für aufbauende Veränderungsanalysen liegen auf der Hand.

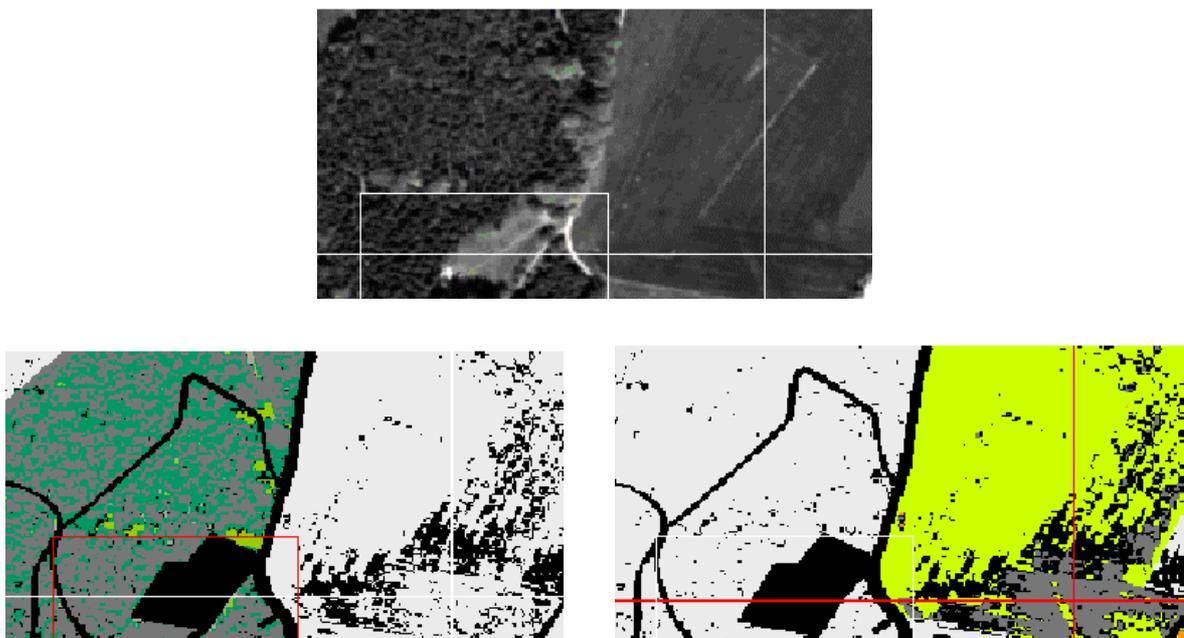


Abb. 6.6: Fehlklassifizierung von Nadelwald- und Ackerflächen durch stark abweichendes, „untypisches“ Reflexionsverhalten von Teilflächen, die folglich der Unterklasse „verschattete Bereiche“ zugeordnet werden (Klassifizierung von nadelwalddominierten Flächen: unten links dunkelgrün; von Ackerflächen: unten rechts hellgrün; verschattete Bereiche jeweils in dunkelgrau, schwarze und hellgraue Areale: nicht definiert bzw. nicht klassifiziert). Suchbox und Fadenkreuz dienen zur Orientierung (screenshots).

Die Abbildungen 6.7 und 6.8 zeigen weitere Beispiele für diesen Fehlertyp.

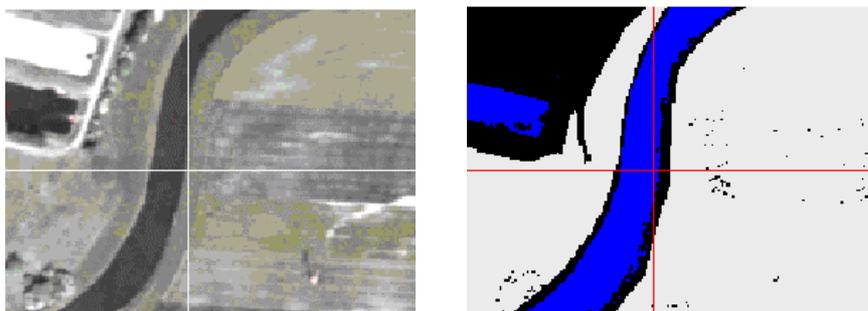


Abb. 6.7: Klassifizierung von Vegetation als Wasserfläche für die Kategorie „Gewässer“ des Luftbildmosaiks von 1990 (blau, rechts). Die Fehlklassifizierung wird erst durch leichte Lageabweichungen zwischen Maske und Bildmosaik aufgedeckt (schwarze und hellgraue Flächen: nicht definiert bzw. nicht klassifiziert; screenshots).

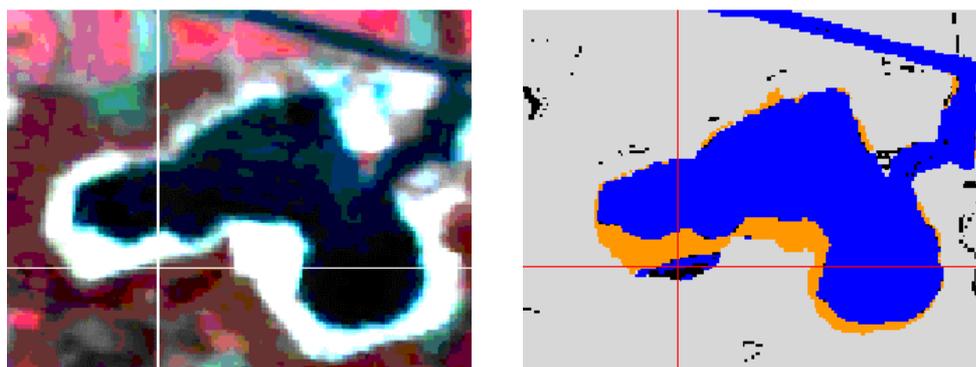


Abb. 6.8: Fehlklassifikation von Nadelwald als Wasserfläche im Rahmen der Klassifikation der Kategorie „Gewässer“ für die Landsat TM-Szene vom 01.05.1986 (vgl. blaue Fläche im Bereich des Fadenkreuzes im klassifizierten Bild rechts; screenshots).

Im Luftbildmosaik von 1990 können Wasserflächen nicht von vegetationsverdeckten Flächen über den Klassifikationsansatz getrennt werden. Dieses Problem wird dadurch evident, daß die Maske und das Mosaik leichte Paßungengenauigkeiten aufweisen (vgl. Abb. 6.7; Kap. 5.1). Andernfalls würde diese Fehlklassifizierung nicht auftreten, da die Maske dies unterbindet. Abbildung 6.8 dokumentiert im Vergleich dazu ein weit verbreitetes Problem konventioneller Klassifikationsansätze (z.B. Verfahren nach der maximalen Mutmaßlichkeit): zwei Objektgruppen, nämlich Nadelwald und Wasserflächen, sind spektral nicht voneinander zu separieren. Dieses Phänomen wird durch den Einsatz von Masken im Zuge der wissenschaftsbasierten Klassifikation in der Regel eliminiert: allerdings besteht hier eine Paßungengenauigkeit von Maske zu TM-Szene, die in diesem Fall auch durch die unterschiedlichen Herstellungs- bzw. Aufnahmedaten von Maske und Szene bedingt sein kann. Die Uferlinie war 1986 noch nicht soweit nach Süden verlagert, wie dies laut Maske (ATKIS-Daten von 2000) ausgewiesen wird.

Die Abbildungen 6.9 und 6.10 veranschaulichen eine weitere Ausprägung des Fehlertyps c).

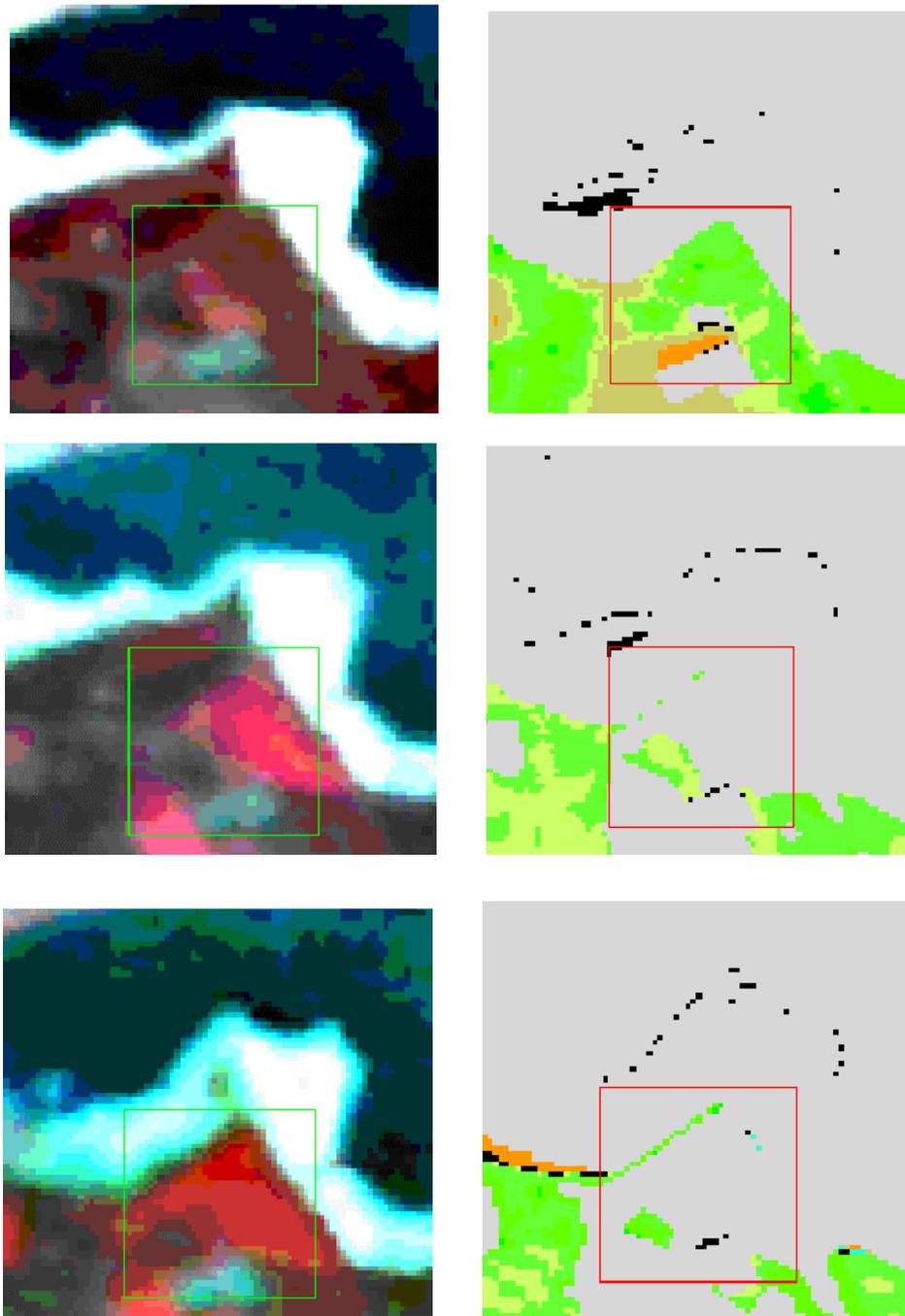


Abb. 6.9: TM-Szenen vom 01.05., 17.05.1986 und 02.07.1991 in chronologischer Reihenfolge links (von oben nach unten), rechts dazu die Klassifikationen der nadelwalddominierten Bereiche (Variationen an Grüntönen stellen nadelwalddominierte Flächen mit verschiedenen Vitalitätsgraden dar; screenshots).

In den Veränderungsanalysen der Aufnahmen vom 01.05. und 17.05.1986 sowie vom 17.05.1986 und 02.07.1991 wird fälschlicherweise ein Rückgang für die klassifizierte nadelwalddominierten Flächen diagnostiziert (vgl. Abb. 6.9, 6.10).

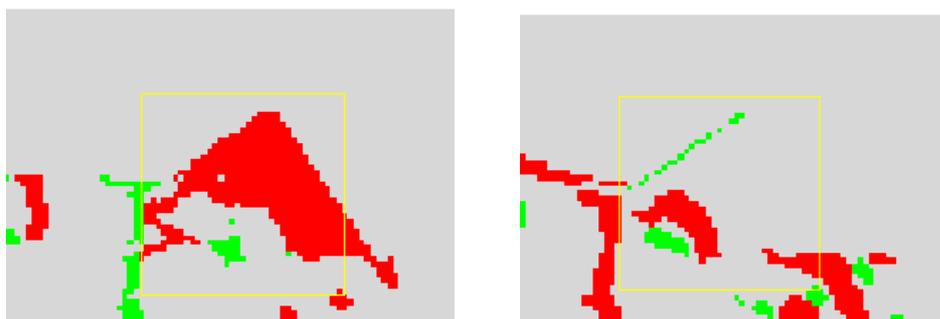


Abb. 6.10: Ergebnis der Veränderungsanalysen für den gleichen Bildausschnitt wie bei Abb. 6.9: 01.05.1986 zu 17.05.1986 links, 17.05.1986 zu 02.07.1991 rechts: rot gefärbt sind Areale, in denen die als nadelwalddominierte klassifizierte Flächen zurückgegangen bzw. weggefallen sind, grün gefärbt sind Flächen, für die Nadelwaldareale klassifiziert werden (screenshots).

Diese Sequenz (Abb. 6.9, 6.10) zeigt, welche Auswirkungen die phänologischen Entwicklungsstadien auf die Resultate der Klassifikationen und Veränderungsanalysen haben. Für die TM-Szene vom 01.05.1986 wird die untersuchte Laubwaldfläche wegen ihrer Reflexionseigenschaften zu einem Großteil der Klasse „nadelwalddominiert“ zugeschlagen. Diese Zuweisung geht flächenmäßig für das Datum vom 17.05.1986 ein wenig zurück, so daß eine Abnahme der zuvor fälschlicherweise als nadelwalddominierte Flächen klassifizierte Bereiche diagnostiziert wird. Für die Szene vom 02.07.1991 werden nur noch vereinzelt Laubwaldareale als „nadelwalddominiert“ klassifiziert. Die Quantifizierung der Nadelwaldflächen, die für die früheren Aufnahmezeitpunkte schon durch Fehlklassifizierungen verfälscht war, wird zusätzlich weiter verfälscht. Die als laubwalddominiert erfaßten Bereiche werden mit fortschreitender Jahreszeit besser von klassifizierten Nadelwaldflächen abgegrenzt, statt als solche klassifiziert zu werden.

Das komplexe Zusammenwirken veränderter Reflexionseigenschaften von Vegetation infolge der phänologischen Entwicklungsstufen wird deutlich. Die einzelnen Ergebnisse weisen Fehler auf, die in vergleichenden Analysen schließlich zu sich potenzierenden Fehlern führen. Demgegenüber zeigt die Klassifikation laubwalddominierter Bereiche für diese drei Aufnahmen einen umgekehrten Effekt. Sie werden zunächst in ihrer erfaßten Flächenausdehnung unterschätzt. Gleichzeitig nehmen die klassifizierte Areale mit fortschreitender Jahreszeit der Aufnahmezeitpunkte flächenmäßig scheinbar überproportional zu.

Dieses Beispiel zeigt sehr eindringlich, wie die Phänologie die Untersuchungsergebnisse beeinflusst, ja sogar verfälscht. Dadurch können die ursprünglichen Monitoringobjekte im Zuge einer Veränderungsanalyse derart überlagert werden, daß keine aussagekräftigen Ergebnisse erzielt werden können.

Abbildung 6.11 weist auf einen weiteren Unterfall des Fehlertyps c) hin.

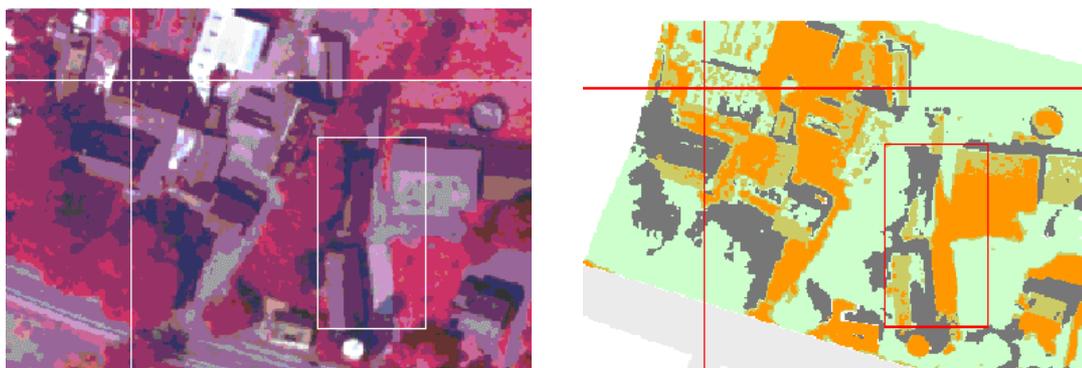


Abb. 6.11: Fehlklassifizierungen von Hausdächern links; rechts: Klassifizierung als „Übergang nicht vital-vital“ (olivgrün) bzw. „vegetationsverdeckt“ (grün) oder „verschattet“ (dunkelgrau), Fadenkreuz und Suchbox dienen zur Orientierung (screenshots).

Das Beispiel zeigt, daß Hausdächer in ihren Spektraleigenschaften die Konditionen anderer Klassen erfüllen, so daß sie diesen Klassen zugeschlagen werden. Sie sind - unter Beibehaltung des Kompromißes, der unter b) erläutert wurde - nicht über die Konditionen der Klasse, zu der sie als Objektgruppe gehören, erfaßbar. Folglich werden Hausdächer für die Kategorie „Mischnutzung“ (i.d.R. Sattel- oder Walmdächer) je nach Lage bzw. Winkel zur Sonne und zur Aufnahmerichtung der Kamera falsch klassifiziert. Das Hausdach wird nicht als eine Fläche einheitlicher Eigenschaften diagnostiziert, sondern zweigeteilt als versiegelte und verschattete Fläche. Dies ist in der Regel die sonnenabgewandte Seite des Hausdachs. Darüber hinaus bestimmt auch das Material, aus dem das Dach erbaut ist, die Spektralreflexion und folglich die Klassifizierung. Dieses Beispiel dokumentiert, daß Lichteinfall und Aufnahmerichtung die Spektraleigenschaften von Objekten derart verändern können, daß sie von anderen Objekten spektral nicht mehr separiert werden können.

Zu d) sonstige Fehlereinflüsse

Abbildung 6.12 illustriert eine weitere Fehlerursache für die Ergebnisse der Klassifikationen der Luftbildmosaiken und der Veränderungsanalysen. Der Schattenwurf, der in den Luftbildmosaiken in Klassen isoliert werden konnte, führt zu Ungenauigkeiten in den Flächenbilanzierungen der Veränderungsanalysen. Je nach Datum und Uhrzeit der Aufnahmen verändern die Schatten ihre Lage und Ausdehnung, so daß Flächenabschätzungen z.B. für klassifizierte vegetationsbestandene Grünlandbereiche leicht fehlerbehaftet sind (vgl. Abb. 6.12).

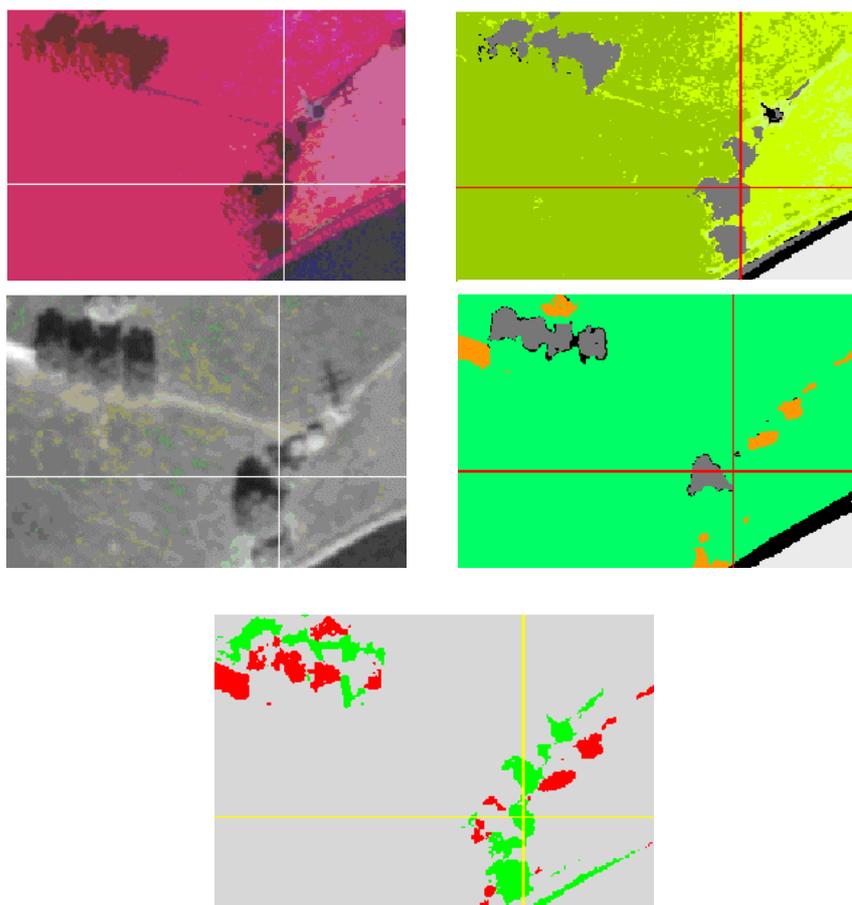


Abb. 6.12: Einfluß der unterschiedlichen Lage und Ausdehnung verschatteter Flächen auf die Flächenbilanzierung im Zuge der Veränderungsanalyse: Beispiel Kategorie „Grünland: vegetationsverdeckt“ (grün gefärbte Bereiche in den beiden klassifizierten Bildern oben rechts; dunkelgrau gefärbte Flächen: verschattet). Die Veränderungsanalyse diagnostiziert Zu- und Abnahmen von vegetationsverdeckten Flächen aufgrund veränderter Schatten (Bild unten, rot und grün eingefärbte Areale; screenshots).

Ein weiterer Aspekt, der eher zu Irritationen als zu Fehlern führt, ist das „Datenhandling“ unter ERDAS Imagine: aufgrund der Eigenschaften der Datensätze sind für das CIR-Luftbildmosaik wie für die Satellitenbildszenen Vitalitätsstufen unterschieden worden, die bis zur höchsten Stufe von  $\geq 0,9$  für den Ratiowert reichen. Unterklassen mit diesen Eigenschaften waren jedoch nicht immer in den Datensätzen vorhanden und folglich auch nicht klassifizierbar. Die Ergebnisbilder weisen diesbezüglich eine Besonderheit auf:

- Im „Raster Attribute Editor“ werden grundsätzlich Bildstatistiken dokumentiert. Klassen, die wegen der Bildeigenschaften nicht klassifizierbar sind, werden im „Editor“ jedoch nur angezeigt, wenn sie in die fortlaufende tabellarische Klassenaufzählung integriert sind. Bilden sie laut Klassifikationsdesign („knowledge engineer“) die letzte Klasse und markieren sie somit zugleich den Schluß in der tabellarischen Dokumentation im „Editor“, so werden sie nicht mehr aufgeführt, sie fallen weg. Diese Eigenart der Software ist anfänglich irreführend; letztendlich zeugt sie jedoch von einem effizienten Umgang mit Daten und Informationen.

Zusammenfassend bleibt für die vorgestellten Fehlertypen folgendes festzuhalten:

- a) Fall a) ist durch zwei Unterfälle gekennzeichnet:
  - Fehler/Verfälschungen, die durch die Geocodierung und die Pixelvervielfachung auftreten und
  - Fehler/Verfälschungen, die durch die Atmosphärenkorrektur induziert sind.
- b) Fall b) ist durch „Pixelausreißer“ mit nicht zu systematisierenden Reflexionscharakteristiken geprägt.
- c) Fall c) wird in vier Varianten unterschieden:
  - unzureichende spektrale Separabilität von Objekten bzw. Objektgruppen in einem Bildsegment/Maske;
  - unzureichende spektrale Separabilität von Objekten bzw. Objektgruppen, die erst durch Paßungenauigkeiten von Datensatz und Maske auffällig werden;
  - unzureichende spektrale Separabilität von Vegetation infolge der phänologischen Stadien;
  - unzureichende spektrale Separabilität von Objekten bzw. Objektgruppen durch veränderte Spektralreflexion infolge des Lichteinfalls und der Aufnahmerichtung des Sensors.
- d) Fall d): hier werden nicht weiter zu systematisierende Fehlerquellen exemplarisch angesprochen.

Die Fehlertypen a) bis c) treten durchaus kombiniert auf, wobei in der Regel a) und b) sowie a) und c) vergesellschaftet auftreten können. Häufig verstärkt der Typ a) bei kombinierten Fehlern den Umfang von b) oder c). Die Typen b) und c) treten demgegenüber nicht kombiniert auf. Nach eingehender Fehleranalyse treten in bezug auf die Vegetation vor allem folgende Fehlklassifizierungen auf:

- Nadelwald wird als Wasserfläche klassifiziert;
- Nadelwald wird als verschattete Fläche klassifiziert;
- Ackerflächen werden als verschattete Fläche klassifiziert.

Die vorgenannten Fehler treten - wie die Analysen zeigen - unsystematisch und unter höchst individuellen Rahmenbedingungen auf. Sie lassen sich daher nicht statistisch erfassen. Es können keine verlässlichen Aussagen über die Eintrittswahrscheinlichkeiten der Fehler gemacht werden; Quantifizierungen erscheinen ebenfalls nicht sinnvoll.

## 7 Kalkulation

Ein wesentlicher Punkt, der häufig über den Einsatz von Fernerkundungsdaten für Fragen des Umweltmonitorings entscheidet, ist der Kostenfaktor. Oftmals herrscht Unklarheit über die tatsächlich anzusetzenden Preise für die Datenbeschaffung, Ausstattung mit Hard- und Software sowie die benötigten Arbeitszeiten für die Auswertung, während die Kosten bereits angewandter Verfahren bekannt sind (hier sind vermeintlich keine Unwägbarkeiten zu erwarten).

Die Tatsache, daß Fernerkundungsdaten qualitativ hochwertige komplementäre Informationen liefern, die auf anderem Wege nicht generierbar sind, tritt im Zuge dieser Abwägungen in der Regel vollständig in den Hintergrund. Dies geschieht, obwohl Fernerkundungsdaten häufig die einzige Chance bieten, (multitemporale) Analysen der tatsächlichen Gegebenheiten zum festgesetzten Erhebungszeitpunkt durchzuführen, da Umweltmonitoringverfahren im allgemeinen retrospektiv ausgerichtet sind.

Daher werden abschließend zu dieser Arbeit exemplarisch Kosten- und Zeitrechnungen zur Datenbeschaffung, Arbeitsausstattung sowie zur Ausführung der Arbeiten aufgestellt. Diese Kalkulationen sollten als Orientierungswerte für die Anwendung der entwickelten Verfahren verstanden werden. Gegenüber der vorliegenden Arbeit, welche die Verfahren und Methoden entwickelt hat, reduziert sich der Kosten-, Arbeits- und Zeitaufwand der Anwendung der Verfahren erheblich. Um eine fallspezifische Kostenrechnung der einzelnen Komponenten zu ermöglichen, werden die einzelnen Posten separat behandelt. Dabei werden unterschieden

- a) Kosten, die für eine umfassende (ideale) Ausstattung eines PC- bzw. IT-Arbeitsplatzes anfallen; Preisbeispiele für eine adäquate Softwareausstattung werden gesondert aufgeführt (vgl. Tab. 7.1., 7.2).
- b) Kosten für Fernerkundungsdaten, Karten bzw. Kartenwerke, DGMs etc. sowie für die einzelnen Arbeiten.

Zu a) Kosten für die Ausstattung eines PC-Arbeitsplatzes

Die nachfolgend in Tabelle 7.1 aufgeführten Kostenstellen orientieren sich am Stand der Technik und den Preisen für 3/2000. Die angegebenen Preise sind Nettopreise; Kosten für Raummiete, Versicherung oder Abschreibungsmöglichkeiten sind nicht enthalten, da diese fallweise berechnet werden müssen.

Tab. 7.1: Einrichtungsgegenstände und Anschaffungskosten

Einrichtungsgegenstand	Kosten (DM)
PC-Ausstattung	ca. 15.000,-
Möbiliar	ca. 20.000,-
Internet-/Telefonanschluß	je ca. 100,-/Monat
<i>detaillierte Auflistung wünschenswerter EDV-Minimalausstattung</i>	
PC, 700 MHz, Pentium III, 30GB-Festplatte, 512 MB Arbeitsspeicher	ca. 3000,-
CD-Brenner z.B. PlexWriter Read/Write 12/10/32 S	800,-
DIN A3-Farb-Drucker mit ca. 1440x720 dpi, verschiedene Papierqualitäten bis Photopapier und Folie inklusive verschiedene Druckqualitäten bis Photoqualität	ca. 1500,-
Plotter z.B. HP DesignJet 3000 CP (Details s. Anhang A, Tab. A.18),	ca. 23.300,-
High-End Trommelscanner Howtek Scanmaster 4500 (bietet gute radiometrische Qualität; weitere Details s. Anhang A, Tab. A.17), alternativ: z.B. Vexcel UltraScan 5000 als geometrisch sehr gut auflösender Scanner	ca. 55.000,-
je nach Anwendungen außerdem (z.B. pc-gestützte stereoskopische Luftbildauswertung) Ausstattung mit:	ca. 800-2500,-
Bildschirm 19 oder 21 Zoll, 1024x786 bei 120 Hz mit 3D-Graphikkarte Oxygen GVX1	ca. 1999,-
AGP, 32 MB mit Stereobrille und Emitter NuVision 60GX	ca. 800,-

Eine leistungsstarke Grundausstattung mit PCs, Druckern/Plottern, CD-Brennern etc. kann heutzutage für Ingenieurbüros und auch Kommunen vorausgesetzt werden, so daß häufig nur noch Kosten für spezielle Software oder Hardware anfallen. Tabelle 7.2 zeigt beispielhaft, welche Software wünschenswert ist. Auf jeden Fall muß eine in der Leistungsfähigkeit annähernd mit ERDAS Imagine vergleichbare Software bereitgestellt werden.

Tab. 7.2: Softwareausstattung und Preisbeispiele

Software/Softwaremodul	Preis
ERDAS Imagine 8.3.1 bzw. 8.4	6 Lizenzen im Hochschulverbund jährl. 4.500,-; für Privatkunden 20.125,- plus 3020,- Wartung jährlich
ATCOR2 als Zusatzmodul zu ERDAS Imagine	einmalige Anschaffung einer unbefristeten Lizenz: 5.600,-
Adobe Photoshop	1 Lizenz: 1400,-; 1 Lizenz im Hochschulbetrieb: ca. 350,-
ArcView	1 Lizenz: ca. 4.000,- für Privatkunden; als Hochschullizenz 2.300,-

Zu b) Kosten für Fernerkundungsdaten, Karten bzw. Kartenwerke, digitale Daten, Arbeiten

Da die Datenqualitäten, die Abgabeeinheiten (quadratkilometerweise, DGK5-Blattschnitt, Mindestgröße von Arealen oder Dateneinheiten in MB, Minisatellitenbildszenen, Viertel-satellitenbildszenen, kanalreduzierte Satellitenbildszenen) sowie die Preise einem schnellen Wandel unterliegen, können nur gemittelte Preise genannt werden (vgl. Tab. 7.3). Als Berechnungsgrundlage dienen das Untersuchungsgebiet dieser Arbeit sowie die dafür benötigte Bildverarbeitung und -auswertung. Auch der angegebene Zeitaufwand für die Ergebnisaufbereitung und die Geländearbeiten orientiert sich an dieser Arbeit. Zur schnellen und aktuellen Orientierung wird nachdrücklich die Internetrecherche empfohlen (vgl. Kap. 5.2, , Tab. 5.30).

Tab. 7.3: Exemplarische Preisliste für Daten (Größe des Untersuchungsgebiets: ca. 200 km<sup>2</sup>)

Daten	Preisbeispiele
Colorluftbilder, Maßstab ca. 1:12.500, 4 Stück	45,- DM/Stück (mit Wissenschaftsrabatt: je 34,- DM)
CIR-Luftbilder, Maßstab ca. 1:5000, 18 Stück	45,- DM/Stück (mit Wissenschaftsrabatt: je 34,- DM)
Landsat MSS-Szene	250,- DM
Landsat TM-Miniszene	200,- DM
ATKIS-Daten	6000,- DM (mit Wissenschaftsrabatt: 1200,-DM)
DGM-Daten	150,- DM (mit Wissenschaftsrabatt 30,- DM)
<b>Summe</b>	<b>7.590,- DM</b>

Im folgenden werden die anfallenden Arbeitsschritte aufgelistet (Tab. 7.4). Dabei sind die Arbeitszeiten dokumentiert, die bei der Anwendung der entwickelten Verfahren berechnet werden müssen.

Tab. 7.4: Arbeiten und angesetzte Arbeitszeit

Arbeiten	Anzahl der Stunden
Mosaikieren der Luftbilder	ca. 54
Atmosphärenkorrektur der Satellitenbilder	ca. 16
Georeferenzieren der Satellitenbilder	ca. pro Szene 1, insgesamt 4
Digitalisieren der Landbedeckungsklassen aus der DGK5	ca. 15
Erstellen der Klassifikationsdesigns (CIR-, Color-Luftbildmosaik, 4 Satellitenbildausschnitte)	ca. zwischen 8 und 40 je nach Datensatzeigenschaften
Ergebnisdarstellung: z.B. Karten	insg. ca. 48
Layout pro Kartentyp	ca. 4
Ausdruck pro Karte je nach Größe und Farbanteil	ca. 20 min
Ergebnispräsentation und Bericht	ca. 16
Geländearbeiten	ca. 8
„Fremd“-arbeit: Scannen der Luftbilder	s. Tab. 7.6

Je nach Arbeitsanforderung wird für die verschiedenen Aufgaben in Anlehnung an die HOAI (1996, [www.hoai.de](http://www.hoai.de)) die in Tabelle 7.5 zusammengefaßte Aufteilung empfohlen.

Tab. 7.5: Empfohlene Zuteilung der Arbeiten nach Qualifikation gemäß HOAI (1996)

techn. Zeichner bzw. vergleichbare Qualifikation, auch studentische Hilfskraft	Fachkraft, Ingenieur oder vergleichbare Qualifikation	Auftragnehmer
Geländearbeit	Geländearbeit	
Georeferenzieren		
Atmosphärenkorrektur	Atmosphärenkorrektur	
Digitalisieren der Landbedeckungsklassen aus der DGK5		
	Klassifikationsdesign	
Ergebnisdarstellung z.B. Karten	Präsentation, Bericht	Präsentation, Bericht

Einzelne Arbeiten sind doppelt aufgeführt: hier sind Und- bzw. Oder-Kombinationen der verschiedenen Mitarbeiter möglich.

Aus den Tabellen 7.4 und 7.5 ergibt sich die in Tabelle 7.6 dokumentierte Nettokostenrechnung der Arbeiten, wobei jeweils die niedrigere Qualifikation angesetzt wird. Die Arbeiten werden nach der Honorarordnung für Architekten und Ingenieure (HOAI) vom

01.06.1996 eingestuft. Gemäß § 6 „Zeithonorar“ der HOAI sind die Entgelte für Tätigkeiten nach den erforderlichen Qualifikationen gestaffelt. Als Orientierungswerte werden die Mittelwerte der Schwankungsbreiten der Beträge angesetzt (z.B. 70-160,- DM/Stunde für den Auftragnehmer: 115,- DM).

Tab. 7.6: Kostenrechnung der einzelnen Arbeiten

Arbeiten	Stundensatz (DM)	Summe (DM)
Geländearbeit	80,- inkl. Zulagen	640,-
Georeferenzieren	72,-	288,-
Atmosphärenkorrektur	72,-	1152,-
Digitalisieren der Landbedeckungsklassen aus der DGK5	72,-	1080,-
Klassifikationsdesign	92,-	736,- bzw. 3.680,-
Ergebnisdarstellung z.B. Karten	72,-	3.456,-
Präsentation, Bericht	92,-	1.472,-
„Fremd“-arbeit: Scannen der Luftbilder (z.B. über GEOSYSTEMS, München)	22 Luftbilder á 34,-DM plus Bearbeitungs- und Materialkosten von ca. 170,-	918,-
<b>Summe</b>		<b>9.742,- bzw. 12.686,-</b>

Die Gesamtkosten setzen sich also zusammen aus (generalisierte Werte):

- Anschaffungs- und Wartungskosten z.B. für ERDAS Imagine (1. Jahr, danach jährlich Wartungskosten): **ca. 6.500,- bzw. 3.000,- DM**
- Kosten für Daten: **ca. 7.590,- DM**
- Kosten für Arbeiten: **ca. 11.200,- DM.**

**Die Kosten belaufen sich auf insgesamt 25.290,- DM.**

Das ergibt bei einem Untersuchungsgebiet von 200 km<sup>2</sup> einen Quadratkilometerpreis von 126,- DM. Die Kosten verhalten sich dabei nicht linear zu zu- oder abnehmender Gebietsgröße. Es liegt auf der Hand, daß diverse Kostenstellen invariant zur Flächengröße sind (Soft- und Hardware z.B.). Manche Kosten reduzieren sich mit zunehmender Flächengröße relativ zur Gesamtsumme (z.B. Satellitenbildszenen), während sich z.B. die Kosten für Luftbilddaten bei abnehmender Flächengröße verringern, also flächenvariabel sind.

Diese (gemittelte) Summe für Investitionen und Unterhalt mag zunächst recht hoch erscheinen. Jedoch ist die Rentabilität dieses Ansatzes im Vergleich zu konventionellen Ansätzen zu beachten. Die vorgestellten Verfahren bieten folgende (Kosten-) Vorteile:

- Die Arbeiten können von einem kleinen Mitarbeiterstab (ca. 1-3) durchgeführt werden.
- Sie sind unabhängig von der Zugänglichkeit des Geländes anwendbar (wetterbedingte oder rechtliche Probleme).
- Sie optimieren und reduzieren kosten- und personalaufwendige sowie zeitintensive Geländearbeiten (Ausstattung mit Geräten, Werkzeug, Wagen, Organisation, ggfs. Unterbringung der Mitarbeiter).
- Sie liefern komplementäre Informationen, die für Umweltmonitoringverfahren von großem Wert sind und auf anderem Wege nicht herstellbar sind.

HILDEBRANDT hat bereits 1996 dokumentiert, daß allein durch den Einsatz von Luftbildern im laufenden Forstbetrieb (Forsteinrichtung) die Gesamtkosten um 30% bis 40% zurückgehen. Zugleich steigt die Arbeitsproduktivität um ca. 15%. Die Arbeiten können wesentlich rationalisiert werden, und es kommt zu einer zeitlichen Straffung der Arbeiten (HILDEBRANDT 1996, S. 361, 364, 390). Daher ist davon auszugehen, daß sich die Gesamtkosten und der Zeitaufwand von Umweltmonitoringverfahren durch die Analyse von Fernerkundungsdaten deutlich reduzieren lassen; zudem sind qualitativ hochwertigere Ergebnisse zu erwarten.

## 8 Schlußfolgerungen

### 8.1 Zusammenfassung und Bewertung

Ausgangspunkt der Arbeit war die Frage, ob und inwiefern die Analyse von Fernerkundungsdaten Arbeitsprozesse und Ergebnisse von Umweltmonitoringverfahren optimieren kann. Hierzu werden zunächst bestehende Definitionen, Methoden- und Untersuchungsstandards sowie Aufgabenfelder für Umweltmonitoringverfahren definiert (vgl. Kap. 1). Anhand des Beispielraums Haltern/die Haard in der nördlichen Ballungsrandzone des Ruhrgebietes, der hohe Nutzungskomplexität aufweist, werden die Möglichkeiten und Grenzen des Einsatzes von Fernerkundungsdaten für Umweltmonitoringfragen geprüft. Neben den bereits genannten Raumansprüchen sind diverse Flächen des Untersuchungsraums für den Natur- und Landschaftsschutz ausgewiesen, und es liegen weitere Planungen vor (Kap. 2). Damit ist gewährleistet, daß die am Beispiel dieses Untersuchungsgebiets entwickelten Verfahren und Methoden auch auf möglichst viele andere nutzungsdifferenzierte Untersuchungsräume übertragen werden können.

Vorher wird geprüft, ob bereits frühere Entwicklungen zur Beobachtung der Umwelt mit Hilfe von Fernerkundungsdaten dokumentiert sind. Die entsprechenden Recherchen ergeben zum einen Mängel bei der Nutzung von Fernerkundungsdaten (Stichwort „data exploitation“; Kap. 1). Zum anderen werden Defizite bei der Umsetzung der Umweltschutzforderungen des SRU gerade auch im Bereich Umweltmonitoringverfahren aufgedeckt (vgl. Kap. 1). Dementsprechend bemüht sich die vorliegende Arbeit, Ansätze zu einem umfassenden Einsatz von Fernerkundungsdaten im Umweltmonitoring zu entwickeln und so einen Beitrag zur Realisierung der Forderungen des SRU zu leisten (vgl. Kap. 1).

Um nicht nur durch die Wahl des Untersuchungsgebietes ein breites Anwendungsspektrum der entwickelten Verfahren und Methoden gewährleisten zu können, sondern auch in fernerkundungstechnischer Hinsicht, werden sehr unterschiedliche Typen von Fernerkundungsdaten geprüft und analysiert. Dies sind

- CIR-Luftbilder,
- Colorluftbilder,
- SPOT PAN-Daten,
- Landsat TM-Daten,
- Landsat MSS-Daten (vgl. Kap. 2).

Die bestehenden Methoden und Techniken der Datenvorprozessierung und Datenanalyse werden sehr gründlich analysiert. Daraus abgeleitete Modifikationen und Neuentwicklungen werden vorgestellt und diskutiert. Im einzelnen werden folgende Ansätze zur Datenvorprozessierung und -analyse behandelt:

- Geocodierung und Mosaikierung der Luftbilddaten (Kap. 3.1),
- Atmosphärenkorrektur und Geocodierung der Satellitenbilddaten (Kap. 3.2),
- Optimierung der Detailschärfe der Datensätze (Kap. 3.2),

- wissensbasierte Einzelbildklassifikationen (Kap. 4.2, 5.1),
- Veränderungsanalysen (Kap. 4.2, 5.1).

Zu den oben genannten Punkten werden stets alternative Verfahren kritisch beleuchtet, bevor die Wahl einer Technik begründet und die Vorgehensweise detailliert beschrieben wird. Diese Themenaufbereitung soll es dem potentiellen Nutzer ermöglichen, getroffene Entscheidungen nachzuvollziehen oder fallspezifisch eine der vorgestellten Alternativen auszuwählen und zu nutzen.

Neuentwicklungen und Modifikationen werden für folgende Verfahren und Methoden vorgenommen:

- die Geocodierung,
- die wissensbasierte Klassifikation und
- die Veränderungsanalyse.

Die **Geocodierung** wird mit der Methode der einfachen Pixelvervielfachung zwecks Verbesserung bzw. Anpassung der Detailschärfe der unterschiedlichen Fernerkundungsdaten kombiniert. Das heißt, daß beide Schritte zu einem Schritt zusammengefaßt werden, um das mehrfache „Resampling“, das zu erheblichen Informationsverlusten führt, zu vermeiden. Diese Vorprozessierungen sind bisher in mindestens zwei getrennten Arbeitsgängen mit entsprechend einhergehenden starken Veränderungen der Intensitätswerte der Pixel durchgeführt worden (vgl. Kap. 3.2; ORTHABER 1999, S. 7).

Für die **wissensbasierte Klassifikation** wurden neue Klassifikatordesigns entwickelt. Bisher sind hierzu keine Ansätze veröffentlicht. Die Designs sind speziell auf die spektralen Eigenschaften der einzelnen Fernerkundungsdatensätze abgestimmt, so daß sie in der Zusammenstellung der Konditionen und dem Aufbau der Entscheidungsbäume erheblich voneinander abweichen, auch wenn sie nach identischen Kategorien aufgeschlüsselt sind (vgl. Kap. 5.1). Damit werden meines Wissens erstmals grundlegende Klassifikatordesigns für CIR- und Colorluftbilddaten sowie für Landsat TM- und MSS-Datensätze vorgelegt. Sie können zukünftig als Basis für weitere Anwendungen dienen, wobei allerdings fallspezifische Modifikationen in Betracht gezogen werden müssen.

Die **Veränderungsanalysen** bauen auf den wissensbasierten Einzelbildklassifikationen auf und stellen neben den Klassifikationsergebnissen wichtige Informationen im Rahmen eines Monitoringverfahrens bereit: sie zeigen Veränderungen in ihrer räumlichen Verortung auf und ermöglichen zudem Quantifizierungen und Flächenbilanzierungen der Veränderungen (vgl. Kap. 4.2, 5.1).

Die Resultate der Arbeit zeigen zum einen, daß die angestrebten **Synergieeffekte** im Zuge der kombinierten Analyse verschiedener Fernerkundungsdaten aufgetreten sind und genutzt werden können; dies gilt vor allem für die Luftbilddaten (vgl. Kap. 1, 5.1). Durch den Vergleich der unabhängigen Einzelbildklassifikationen der Luftbildmosaike von 1985 und 1990 wird bewiesen, daß multisensorale und multiskalare Daten für eine Veränderungsanalyse erfolgreich kombiniert werden können. Zwar deckt die Arbeit auch Schwächen in

der Vergleichbarkeit der Daten auf, die vor allem durch die verschiedenen Spektraleigenschaften sowie die unterschiedlichen phänologischen Stadien bedingt sind. Dieses Ergebnis eröffnet jedoch eine weitere Chance: CIR-Luftbildmosaike unterschiedlicher Jahrgänge, unterschiedlicher Filmqualitäten oder verschiedener Filmchargen können demzufolge ohne weiteres kombiniert ausgewertet werden, ohne daß die herkömmlichen Probleme durch variierende Spektraleigenschaften der Datensätze auftreten. Dies wird durch die Einzelbildklassifikationen unterbunden, wobei die in anderen Anwendungsfällen notwendigen Modifikationen der Klassifikatordesigns minimal sein dürften.

Ähnliches gilt für die Satellitenbilddaten, da auch hier durch die unabhängig durchgeführten Einzelklassifikationen vergleichbare bzw. gleiche spektrale Eigenschaften einzelner Satellitenbilddatensätze nicht mehr zwingend Voraussetzung für Vergleichsanalysen sind. Darüber hinaus vereinfacht die Atmosphärenkorrektur der Satellitenbilddaten die Auswertungen der Daten, da auf Basis der absoluten Reflexionswerte, die über die Korrektur generierbar sind, zusätzlich vergleichende Analysen der absoluten DN's möglich sind. So können zum einen die Klassifikationen der einzelnen Datensätze ausgewertet werden. Zum anderen können die vorprozessierten Datensätze auch für vergleichende Analysen der Pixelgrauwerte genutzt werden. Zudem kann die Atmosphärenkorrektur den Aufbau der Klassifikationsdesigns vereinfachen, da Daten des gleichen Sensors nach der Korrektur idealerweise dieselben Spektraleigenschaften aufweisen. Diese Korrekturen können für diese Arbeit schon teilweise durchgeführt werden; die Klassifikationsdesigns der Landsat TM-Aufnahmen vom 01.05.1986 und vom 02.07.1991 weisen zu einem erheblichen Teil identische Grenzwerte für die Eingangsvariablen auf (vgl. Kap. 5.1). Außerdem ermöglichen die „multisaisonalen“ Datensätze die Identifikation z.B. einzelner Laubwaldflächen in der Aufnahme vom 01.05.1986. Diese Bereiche werden erst über die Auswertung der Aufnahmen vom 17.05. bzw. 02.07. ansprechbar. Das zeigt, daß die Nutzung dieser multitemporalen, aber phänologisch nicht unbedingt kompatiblen Datensätze auch Chancen birgt, die Vegetation aufgrund ihrer phänologischen Entwicklungsphasen, die in „multisaisonalen“ Datensätzen abgebildet sind, zu benennen.

Eingangs der Arbeit wird die Entwicklung eines Methoden „Mix“ mit *emergenten Eigenschaften* als ein Teilziel formuliert (vgl. Kap. 1.4). Dieses Teilziel kann für wesentliche Arbeitsschritte der vorliegenden Arbeit erreicht werden wie

- die Geocodierung und Pixelvervielfachung sowie
- die wissensbasierten Einzelbildklassifikationen und die Veränderungsanalysen.

Insgesamt wird erfolgreich demonstriert, daß nicht nur mit analogen „Original“-Luftbildern, sondern auch mit gebräuchlichen, geometrisch nicht besonders hochauflösenden Satellitenbilddaten komplementäre Informationen für Umweltmonitorings bereitgestellt werden können (auch wenn die Arbeit gezeigt hat, daß SPOT PAN-Daten kaum brauchbar sind). Dieser Punkt ist besonders hervorzuheben, da Umweltmonitoringverfahren heutzutage mehrheitlich retrospektiv ausgerichtet sind. Demzufolge muß man auf vorhandene Fernerkundungsdaten, sprich analoge Luftbilder und relativ gering auflösende Satellitenbilddaten,

zurückgreifen. Neuere, höher auflösende Daten, wie z.B. solche des Sensors IKONOS, sind für zurückliegende Beobachtungszeiträume nicht verfügbar.

Darüber hinaus sind diese Satellitenbilddaten aufgrund ihrer schlechteren geometrischen Auflösung im allgemeinen sehr viel günstiger zu erwerben als höher auflösende Datensätze, wie z.B. die des IKONOS-Sensors. Dies ist ein entscheidender Kostenfaktor für Kommunen und Büros. Folglich dokumentiert die Arbeit, daß mit Hilfe gängiger Fernerkundungsdaten sehr viel mehr und bessere Möglichkeiten der Extraktion relevanter Information für das Umweltmonitoring bestehen, als bislang angenommen wird (Kap. 1.4). Kapitel 5.2 gibt eine Übersicht über die *Handlungsempfehlungen* für die praxisorientierte Anwendung und ermöglicht somit die Übernahme der entwickelten Methoden, Verfahren und Techniken für Ingenieurbüros und Kommunen.

## 8.2 Ausblick

Bei der Entwicklung von neuen Fernerkundungssensoren sowie neuer Softwareprodukte sind in den nächsten Jahren zwar keine spektakulären Entwicklungen oder gar revolutionäre Umwälzungen zu erwarten. Jedoch kann man davon ausgehen, daß die bisherige zügige Entwicklung auf diesem Sektor anhalten wird. So werden neue Anwendungsmöglichkeiten entdeckt, operationalisiert, optimiert und etabliert werden. Dies gilt z.B. für Stadtplanungsfragen, die Planung von Mobiltelefonnetzen, die Schadensanalysen für Versicherungen nach Naturkatastrophen, das „Precision Farming“ und natürlich auch für Umweltmonitoringverfahren.

Mit der Entwicklung neuer Sensoren halten auch neue Prozessierungs- und Analysetechniken Einzug:

- Dabei liegt der Schwerpunkt derzeit zum einen auf der Entwicklung hochauflösender, flugzeuggestützter Multispektralscanner. Sie verbinden die häufig gewünschte gute spektrale Auflösung mit einer akzeptablen Bodenauflösung, wobei die Daten sofort digital vorliegen. Die Analog-Digital-Wandlung, wie sie z.B. für konventionelle Luftbilder durchgeführt werden muß, entfällt. Allerdings wird auch in Zukunft die Vielfalt an Fernerkundungsdaten bestehen bleiben; denn die verschiedenen Anwendungen benötigen Fernerkundungsdaten mit zum Teil sehr unterschiedlichen spektralen und geometrischen Qualitäten. Daneben wird es immer Bestrebungen geben, die geometrische Auflösung der Daten weiter zu optimieren. Solche Daten werden jedoch auch zukünftig nicht den Markt beherrschen, da die Preise für diese Daten sowie die Datenmengen, die durch die höheren Auflösungen entstehen, als limitierende Faktoren für die Kosten und Effizienz von Projekten u.ä. wirken.
- Zum anderen zeigt die Entwicklung neuer GIS- und Fernerkundungssoftware, daß die jahrelang bestehende (latente) Konkurrenz der unterschiedlichen Ansätze - um nicht zu sagen „Ideologien“ - deutlich abgeklungen ist. Vielmehr haben die Experten erkannt, daß sich beide Ansätze hervorragend ergänzen (z.B. enge Kooperation zwischen ESRI und

ERDAS sowie Modul- und Funktionsabstimmung von ArcView und ERDAS Imagine). Folglich werden in GIS-Softwarepaketen zunehmend Funktionen zur Auswertung von Fernerkundungsdaten implementiert (z.B. IDRISI), während kommerzielle Fernerkundungssoftware mittlerweile häufig über vielfältige GIS-Funktionen verfügt (z.B. ERDAS Imagine). Heutzutage sind Vektor- und Rasterdaten über etablierte Funktionen in den meisten GIS- und Fernerkundungssoftwarepaketen umwandelbar; die Kompatibilität ist weitgehend gesichert (vgl. die kritische Diskussion dazu bei GAHEGAN & EHLERS 2000, S. 176 ff.).

Parallel dazu findet eine Globalisierung des Marktes für Fernerkundungsdaten statt. Sie ist Teil der Entwicklung einer globalen Informationsinfrastruktur („development of a global information infrastructure“: SLONECKER et al. 1998, S. 590). Dieser Prozeß wurde durch das Ende des Kalten Krieges in Gang gesetzt. Die osteuropäischen Staaten, allen voran die ehemalige Sowjetunion, öffneten die Zugänge zu ihren Fernerkundungsprodukten. Der Markt wurde und wird zunehmend privatisiert. Heutzutage wird diese Entwicklung zusätzlich durch niedrige Preise für leistungsstarke Hard- und Software sowie das rasante Wachstum des Internets angetrieben. Dadurch eröffnen sich ungeahnte Möglichkeiten der Vermarktung und des Vertriebs (auch) von Fernerkundungsdaten, da das Internet als Datenübertragungsmedium bereitsteht (vgl. auch WITSCHAS 2000, S. 281 ff.). Die bisherige Vormachtstellung von Regierungen auf diesem Sektor bröckelt. Bisher waren sie die einzigen Stellen, die die immensen Geldsummen für diesen Forschungsbereich zur Verfügung stellen konnten. Mit sinkenden Kosten öffnet sich dieser Bereich zunehmend auch für Privatfirmen.

Natürlich entfachen diese neuen Möglichkeiten erneut die Diskussionen um Moral und Ethik, um Gesetzgebungen zu Herstellung und Vertrieb der Daten, um (inter-)nationale Sicherheitsfragen sowie Urheber- und Vervielfältigungsrechte neu (siehe dazu auch die Artikel von KALENSKY 1996, S. 416; TAHU et al. 1998, S. 179 ff.; ABIODU 1998, S. 229 ff.; VON KRIES 2000, S. 163 ff.). Dem steht gegenüber, daß die zunehmende Internationalisierung auch Chancen der Kooperationen bei der Entwicklung neuer Sensoren und Software sowie für den Betrieb und Unterhalt der verschiedenen Systeme bietet (Multinationale Konzerne, „joint ventures“, Strategische Allianzen, Internationale Verträge: TAHU et al. 1998, S. 179 ff.; vgl. ABIODU 1998, S. 229 ff.). Mit Spannung bleibt zu beobachten, ob Experten, wie z.B. Juristen, oder die wachsende Nachfrage nach Fernerkundungsdaten die bisher ungeklärten vertraglichen Bestimmungen und Verhaltenskodizes bestimmen werden.

Schließlich lassen sich für die zukünftige effektive und verantwortungsvolle Nutzung von Fernerkundungsdaten folgende Forderungen formulieren:

- Aufbau und Etablierung nutzerfreundlicher Datenarchive und effektiver, übersichtlicher Informationsnetzwerke; hervorzuheben ist dabei, daß Qualitätsstandards und Datenformate dafür unbedingt harmonisiert werden müssen.
- Forderung nach einer integrativen, harmonisierten Datengenerierung auf internationalem Niveau für international, national oder regional ausgerichtete Projekte.
- Festlegung der Urheber- und Vervielfältigungsrechte (international oder/und national).

- Einführung einer einheitlichen vernünftigen Preisstruktur (z.B. gestaffelt über Szenengrößen, Aktualität der Daten, Auflösungsvermögen der Daten) und Abbau von Monopolstellungen einzelner Institutionen am Markt (vgl. auch KALENSKY 1996, S. 416).

Unvermeidbar wird dabei in Zukunft wohl auch sein, daß der militärische Markt weiterhin parallel zum zivilen Markt existiert.

Letztendlich ist davon auszugehen, daß Fernerkundungsdaten zukünftig als selbstverständliche Werkzeuge für die verschiedensten Anwendungen genutzt werden. Der Öffentlichkeit werden diese Daten bereits heute regelmäßig als Informationsquelle dargeboten, sei es im Rahmen der Wettervorhersage im Fernsehen oder Internet oder im Zuge der Kriegsberichterstattung aus Krisenregionen. Man kann davon ausgehen, daß die jetzige Generation damit ebenso selbstverständlich aufwächst, wie frühere Generationen mit Schul- und Umweltatlanten oder auch dem Telefon oder Fernsehen als Informationsmedium.

Entsprechend ist die Nutzung von Fernerkundungsdaten in Politik und Wirtschaft für Planungs- und Umweltfragen nicht mehr aufzuhalten, da sie fundierte Informationen zu liefern vermag, Arbeitsprozesse effizienter gestaltet sowie Ergebnisse und Präsentationstechniken optimiert. Die vorliegende Arbeit stellt einen zukunftsweisenden Beitrag in der Entwicklung von Einsatzmöglichkeiten für Fernerkundungsdaten auf einem Gebiet dar, das schon jetzt große Bedeutung hat und in Zukunft noch größere Bedeutung erlangen wird, nämlich: im Umweltmonitoring.



### Literaturverzeichnis

Es wurde versucht, die Autoren den Regeln entsprechend vollständig anzugeben. Leider konnte dies für eine Reihe von Fällen nicht bewerkstelligt werden. Hier konnten lediglich die Vornamen in Abkürzung recherchiert werden. Vereinzelt war auch dies nicht möglich, so daß Hinweise auf die Vornamen der Autoren fehlen. Darüber hinaus konnten für einige Arbeiten nicht alle beteiligten Autoren namentlich aufgeführt werden, da diese Angaben den benutzten Quellen nicht zu entnehmen waren. Diese Liste enthält zudem einige Arbeiten, die nur auf CD-Rom erhältlich sind; auf die Seitenangaben zu diesen Titeln wurde verzichtet.

- ABIODU, ADIGUH A. (1998): Remote Sensing in the information age. In: Space Policy, No. 14, S. 229-238.
- ABUELGASIM, A. A. et al. (1999): Change Detection Using Adaptive Fuzzy Neural Networks: Environmental Damage Assessment after the Gulf War. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 48, No. 70, S. 208-223.
- AFEK, Y. & A. BRAND (1998): Mosaicking of Orthorectified Aerial Images. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 64, No. 2, S. 115-125.
- AKADEMIE FÜR NATURSCHUTZ UND LANDSCHAFTSPFLEGE (Hrsg.) (1991): Laufener Seminarbeiträge 7/91. Laufen/Salzach.
- AKADEMIE FÜR RAUMFORSCHUNG UND LANDESPLANUNG NRW (Hrsg.) (1972): Deutscher Planungsatlas, Lieferung 3, Bd. 1. Düsseldorf.
- AKCA, A. et al. (1971): Application of Remote Sensors in Forestry. Joint Report by Working Group "Application of Remote Sensors in Forestry". Freiburg.
- ALBERTZ, JÖRG (1963): Deutsches Schrifttum über Bildmessung und Luftbildwesen. Nachweis der wichtigsten deutschsprachigen Veröffentlichungen 1938-1960. In: Nachrichten aus dem Karten- und Vermessungswesen, Reihe IV: Beiträge zur Dokumentation, H. 1. Frankfurt a. M.
- ALBERTZ, JÖRG, W. HARTERMANN & F. SCHOLTEN (1989): Digitale geometrische Aufbereitung multisensoraler und multitemporaler Fernerkundungsdaten für die Waldschadensforschung. In: DLR Oberpfaffenhofen (Hrsg.) (1989): Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung. Oberpfaffenhofen. S. 73-91.
- ARBEITSGRUPPE FORSTLICHER LUFTBILDINTERPRETEN (AFL) (1988): Auswertung von Color-Infrarot-Luftbildern. Recklinghausen.
- ARBEITSGRUPPE FORSTLICHER LUFTBILDINTERPRETEN (AFL) (1998): Luftbildinterpretationsschlüssel; Bestimmung der natürlichen Altersklasse von Waldbeständen im CIR-Luftbild. In: LÖBF-Mitteilungen, H. 1, S. 45-50.
- ARNBERGER, ERIK (Hrsg.) (1989): Die Kartographie und ihre Randgebiete, Bd. IV/1. Wien.
- ATKINSON, P. M. & A. R. L. TATNALL (1997): Neural Networks in Remote Sensing. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, No. 4, S. 699-709.

- BADHWAR, G. D., R. B. MACDONALD & N. C. METHA (1986): Satellite derived leaf area index and vegetation maps as input to global carbon cycle models - a hierarchical approach. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 7, No. 2, S. 265-281.
- BÄHR, HANS-PETER & THOMAS VÖGTLE (1991): Digitale Bildverarbeitung. Anwendung in Photogrammetrie, Kartographie und Fernerkundung. 2. Neubearb. Aufl., Karlsruhe.
- BAKER, WILLIAM L., JIMMIE J. HONAKE & PETER J. WEISBERG (1995): Using Aerial Photography and GIS to Map the Forest-Tundra Ecotone in Rocky Mountain National Park, Colorado, for Global Change Research. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 61, No. 3, S. 313-320.
- BANNINGER, C. (1986): Optimal Thematic Mapper Bands and Transformations for Discerning Metal Stress in Coniferous Tree Canopies. In: Symposium on Remote Sensing for Resources Development and Environmental Management. Enschede. S. 371-374.
- BARET, F., G. GUYOT & D. J. MAJOR (Hrsg.) (1989): TSAVI: A vegetation index which minimizes soil brightness effects on LAI and APAR estimation. In: Proceedings of 12. Canadian Symposium on Remote Sensing. IGARSS '90, July 10-14. Vancouver/Canada.
- BARNEY, GERALD O. et al. (Hrsg.) (1980): Global 2000. Frankfurt a. M. u.a.
- BARSCH, HEINER & HANS WIRTH (1981): Ergebnisse der Fernerkundung von Flächennutzungsstrukturen in der DDR im Rahmen des Experiments "Raduga". In: Zeitschrift für den Erdkundeunterricht, 33. Jg., H. 4, S. 149-156.
- BARSCH, HEINER & HANS WIRTH (1983): Methodische Untersuchungen zur Auswertung multispektraler Fernerkundungsdaten für Flächennutzungskartierungen in der DDR. In: Petermanns Geographische Mitteilungen, H. 3, S. 191-202.
- BARSCH, HEINER, SYBILLE ITZEROTT, RAINER SÖLLNER & HORST WEICHELT (1989): Kontrolle des Zustandes agrotechnischer Geosysteme auf der Grundlage spektraler Signaturen - Ergebnisse des Interkosmos-Experiments Geoex-86. In: Petermanns Geographische Mitteilungen, H. 1, S. 47-58.
- BASTIAN, OLAF & KARL-FRIEDRICH SCHREIBER (Hrsg.) (1994): Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft. Jena, Stuttgart.
- BASTIAN, OLAF & KARL-FRIEDRICH SCHREIBER (Hrsg.) (1999): Analyse und ökologische Bewertung der Landschaft. 2. Neubearb. Aufl., Heidelberg, Berlin.
- BAUMANN, H. (1957): Forstliche Luftbild-Interpretation. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg Bd. 2. Stuttgart.
- BAUMGARTNER, ALBERT et al. (1999): Automatic Road Extraction Based on Multi-Scale, Grouping and Context. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 65, No. 7, S. 777-785.
- BEAUBIEN, J. (1979): Forest type mapping from Landsat digital data. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 45, No. 8, S. 1135-1144.

- BECKER, F., F. NERRY & P. RAMANANTSIZEHENA (1988): Towards a Quantitative Use of Aerial Color Infrared Films. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 54, No. 6, S. 743-750.
- BEN-DOR, E. & H. SAARONI (1997): Airborne Video thermal radiometry as a tool for monitoring micro-scale structures of the urban heat island. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, No. 14, S. 3039-3053.
- BENNET, R. J. & R. J. CHORLEY (1978): Environment Systems. London.
- BENNINGHAUS, HANS (1982): Statistik für Soziologen: 1 Deskriptive Statistik. 4. Aufl., Stuttgart.
- BENSON, M. L. & W. G. SIMS (1970): The truth about false color film - an Australian view. In: Photogrammetric Record, Vol. 6, No. 35, S. 446-451.
- BIERHALS, E. (1988): CIR-Luftbilder für die flächendeckende Biotopkartierung. In: Informationen des Naturschutz Niedersachsen, 8. Jg., H. 5, S. 77-104.
- BIERMANN, FRANK (1999): Die UN-Sondergeneralversammlung über Umwelt und Entwicklung 1997. In: Wissenschaftszentrum Berlin & Bundesdeutscher Arbeitskreis für Umweltbewußtes Management (Hrsg.): Jahrbuch Ökologie 1998. Hamburg, München. S. 133 ff.
- BLAB, J., E. SCHRÖDER & W. VÖLKL (Hrsg.) (1994): Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz. H. 40: Effizienzkontrollen im Naturschutz. Bonn Bad-Godesberg.
- BLASCHKE, THOMAS (Hrsg.) (1999): Umweltmonitoring und Umweltmodellierung: GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Entwicklung. Heidelberg.
- BRAKENHIELM, SVEN (1989): Umweltmonitoring in schwedischen Naturwaldreservaten - am Beispiel von Vegetation und Boden. In: Natur und Landschaft, 64. Jg., H. 12, S. 583-586.
- BUNDESMINISTER FÜR RAUMORDNUNG, BAUWESEN UND STÄDTEBAU (Hrsg.) (1979): Auswertung von Satellitenaufnahmen zur Gewinnung von Flächennutzungsdaten. Forschungsauftrag BMBau RS II 4-704102-76.21. Bonn.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG , WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE & DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT (Hrsg.) (1999): Erdanwendungen der Weltraumtechnik - Geo-Informationen vom Satelliten zum Verbraucher. Bonn.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT & BUNDESMINISTERIUM FÜR BILDUNG, WISSENSCHAFT, FORSCHUNG UND TECHNOLOGIE (Hrsg.) (1994): Satellitenfernerkundung für Umweltpolitik und -forschung. Bestandsaufnahme - Analyse - Perspektiven. Bonn.

- BURGER, REINHOLD (1992): Einbeziehung von Geoinformation und Geowissen in die Klassifikation von Satellitenbildern mit Hilfe eines evidenztheoretischen Ansatzes. In: GÜNTHER, OLIVER & WOLF-FRITZ RIEKERT (Hrsg.): Wissensbasierte Methoden zur Fernerkundung der Umwelt. Karlsruhe, S. 111-146.
- BURRICHTER, E. (1973): Die potentiell natürliche Vegetation in der Westfälischen Bucht. Erläuterungen zur Übersichtskarte 1:200 000. Siedlung und Landschaft in Westfalen, Bd. 8. Münster.
- CARPER, JOSEPH W., THOMAS M. LILLESAND & RALPH W. KIEFER (1990): The Use of Intensity-Hue-Saturation Transformations for Merging SPOT Panchromatic and Multispectral Image Data. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 56, No. 6, S. 459-467.
- CHAVEZ JR., PAT S. (1996): Image-Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 9, S. 1025-1036.
- CHAVEZ JR., PAT S., STUART C. SIDES & JEFFREY A. ANDERSON (1991): Comparison of three different methods to merge multiresolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT Panchromatic. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 57, No. 3, S. 295-303.
- CHICA-OLMO, M. & F. ABARCA-HERNÁNDEZ (1998): Radiometric coregionalization of Landsat TM and SPOT HRV images. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 5, S. 997-1005.
- COLLIER, P. (1989): Radiometric monitoring of moisture stress in irrigated cotton. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 10, No. 8, S. 1445-1450.
- COLLINS, H. G. & A. H. EL-BEIK (1971): Population Census with the aid of areal photographs: an experiment in the City of Leeds. In: Photogrammetric Record, Vol. 7, No. 4, S. 16-26.
- COLWELL, R. N. (1978): Keynote address: History and Future of Remote Sensing, Technology and Education. In: Conference of Remote Sensing Educators: A Workshop held at Stanford University by NASA Ames Research Center. Moffet Field, Calif./USA, S. 3-92.
- COLWELL, R. N. (Hrsg.) (1983): Manual of Remote Sensing in two Volumes. Falls Church, Virginia/USA.
- CONGALTON, RUSSEL G. (1994): A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. In: FENSTERMAKER, LYNN K. (Hrsg.) (1994): Remote Sensing Thematic Accuracy Assessment: A Compendium. Maryland/USA, S. 3-14.
- COULTER, LLOYD et al. (1999): Deriving Current Land-Use Information for Metropolitan Transportation Planning through Integration of Remotely Sensed Data and GIS. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 65, No. 11, S. 1293-1300.
- CRACKNELL, ARTHUR P. (1997): The Advanced Very High Resolution Radiometer. Bristol/USA, London.

- CRACKNELL, ARTHUR P. & LADSON HAYES (1993): Introduction to Remote Sensing. 2. Aufl., London u.a.
- CRACKNELL, ARTHUR P. & M. R. SARADJIAN (1996): Monitoring of straw burning in the U.K. using AVHRR data, summer 1995. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 17, No. 12, S. 2463-2466.
- CRIST, E. P. & R. J. KAUTH (1986): The Tasseled Cap De-Mystified. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 52, No. 1, S. 81-86.
- CSAPLOVICS, E. (1992): Analysis of colourinfrared aerial photography and SPOT satellite data for monitoring land cover change of a heatland region of the cause du Larzac. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 13, No. 3, S. 441-460.
- CURRAN, P. J. & H. D. WILLIAMSON (1988): Selecting a spatial resolution for estimation of per-field green leaf area index. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 9, No. 7, S. 1243-1250.
- CZERANKA, MARION & MANFRED EHLERS (1996): GIS als Instrument zur Entscheidungsunterstützung. In: GIS-Tage Flensburg, 26.-28.06.1996. Flensburg, S. 1-14.
- DAVIS, FRANK W. et al. (1991): Environmental Analysis Using Integrated GIS and Remotely Sensed Data: Some Research Needs and Priorities. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 57, No. 6, S. 689-697.
- DEGE, WILHELM & WILFRIED DEGE (1983): Das Ruhrgebiet. 3. Aufl. Berlin, Stuttgart.
- DEMIRCAN, ASLAN (1995): Die Nutzung fernerkundlich bestimmter Pflanzenparameter zur flächenhaften Modellierung von Ertragsbildung und Verdunstung. Münchener Geographische Abhandlungen, Reihe B, Bd. B 20.
- DEMPSTER, A. P. (1967): Upper and Lower Probabilities Induced by a Multivalued Mapping. In: Annals of Mathematical Statistics, No. 38, S. X.
- DEMPSTER, A. P. (1968): A Generalization of Bayesian Inference. In: Journal of the Royal Statistical Society, No. 30, S. 205-247.
- DERENYI, EUGENE & ROSTAM YAZDANI (1982): Monitoring the Growth of Crops using digital Landsat MSS Data. In: International Symposium on Remote Sensing, First Thematic Conference Cairo/Egypt 1982, S. 747-753.
- DESACHY, J., P. DEBORD & S. CASTAN (1988): An Expert System for Satellite Image Interpretation and G.I.S. Based Problem Solving. In: International Archive of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol. 26, S. 518-528.
- DEUTSCHE FORSCHUNGSANSTALT FÜR LUFT- UND RAUMFAHRT, DLR (Hrsg.) (1987): Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung. Tagungsband 2. München.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD, Hrsg.) (1955-1997): Klimadaten der Station Herten (früher Recklinghausen). Essen.

- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD, Hrsg.) (1985, 1986, 1990, 1991): Naturraum Kernmünsterland: Phänologische Daten. Offenbach a. M.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD, Hrsg.) (1986, 1991): Europäischer Wetterbericht: Aerologische Wettermeldungen für den 01-05.1986, 17.05.1986, 02.07.1991, Station Essen. Essen.
- DEUTSCHER WETTERDIENST (DWD, Hrsg.) (1991): Anleitung für die phänologischen Beobachter des Deutschen Wetterdienstes. 3. Aufl., Offenbach a. M.
- DODT, JÜRGEN (1974): Luftbilddauswertung durch 'Indikatoren'. Möglichkeiten und Grenzen der Datengewinnung für die Raumplanung. In: Vermessungswesen und Raumordnung, Vermessungstechnische Rundschau, 36. Jg., H. 12, S. 433-444.
- DÖRFEL, HANS-JOACHIM (1978): Phänologische Aspekte bei der Fernerkundung von Vegetationsflächen. Proceedings of the International Symposium on Remote Sensing for Observation and Inventory of Earth Resources and the Endangered Environment, July 2-8, Vol. III. International Archives of Photogrammetry 22,7. Freiburg.
- DRAGGAN, S., J. COHRSSON & R. E. MORRISON (1987): Environmental Monitoring, Assessment and Management. New York.
- DRIVER, S. THACKWRAY & GRAHAM CHAPMAN (1996): Time-Scales and Environmental Change. London, New York.
- DUDA, R. O. & P. E. HART (1973): Pattern Classification and Scene Analysis. New York.
- DUHAIME, ROLAND J., PETER V. AUGUST & WILLIAM R. WRIGHT (1997): Automated Vegetation Mapping using Digital Orthophotography. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 63, No. 11, S. 1295-1302.
- DÜRKOP, KRACHT & WASIELEWSKI (1995): Die künftige EG-Richtlinie über die integrierte Vermeidung und Verminderung der Umweltverschmutzung (IVU-Richtlinie). In: Umwelt und Planungsrecht (UPR), H. 11, S. 425-434.
- DUTTA, AGNEYO (1999): Erdas Imagine als Basis für eine GIS-Applikation in der Verkehrsplanung. In: GUGM-Tagungsprotokoll 15.-16.09.1999. München (CD-Rom).
- DWIVEDI, R. S. et al. (1997): The inventory and monitoring of eroded lands using remote sensing data. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, No. 1, S. 107-119.
- EHLERS, MANFRED (1995): Integrating Remote Sensing and GIS for Environmental Monitoring and Modelling: Where are we? In: Geo Info Systems, No. July, S. 36-43.
- EHLERS, MANFRED (1997): Fernerkundung und GIS bei Umweltmonitoring und Umweltmanagement. In: Mitteilungen des Instituts für Strukturforchung und Planung in agrarischen Intensivgebieten (ISPA), Hochschule Vechta, H. 28, S. 7-18.

- EHLERS, MANFRED & MATTHIAS MÖLLER (1997): Sehr hoch auflösende elektrooptische Satellitensensoren. Perspektiven zur angewandten Nutzung zukünftiger und bestehender Satellitenbildprodukte. In: Mitteilungen des Instituts für Strukturforschung und Planung in agrarischen Intensivgebieten, Hochschule Vechta, H. 28, S. 19-35.
- EHLERS, MANFRED & ULRICH RHEIN (1995): Environmental Monitoring - Statewide Comparative Landuse, Classification in lower Saxony focusing on moor and pasture areas. In: Proceedings 9th International Symposium on Computer Science for Environmental Protection CSEP 95, Vol. 1. Berlin, S. 209-218.
- EINMNOH, APISIT & RAJENDRA P. SHRESTHA (2000): Application of DEM Data to Landsat Image Classification: Evaluation in a Tropical Wet-Dry Landscape of Thailand. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 66, No. 3, S. 297-304.
- ERDAS INC. (Hrsg.) (1999): Erdas Field Guide. 5. Aufl., Atlanta, Georgia.
- ERDAS INC. (Hrsg.) (2000): Erdas Imagine 8.4: online documentation. Atlanta, Georgia (CD-Rom).
- EUROPEAN SPACE REPORT VERLAG (Hrsg.) (1993): Globaler Wandel - Bestandsaufnahme einer Katastrophe. Der Einsatz von Satelliten beim Umweltschutz und in Entwicklungsländern. München.
- EVERITT, J. H., D. E. ESCOBAR & M. A. ALANIZ (1987): Drought-Stress Detection of Buffelgrass with Color-Infrared Aerial Photography and Computer-Aided Image Processing. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 53, No. 9, S. 1255-1258.
- EWALD, ERICH (1920): Die Flugzeugphotographie im Dienste der Geographie. In: Petermanns Geographische Mitteilungen, H. 1/2, S. 1-6.
- EWALD, ERICH (1922): Die Raumbildaufnahme vom Flugzeug und ihre Bedeutung für die Geographie. In: Petermanns Geographische Mitteilungen, H. 7/8, S. 148-149.
- FELS, EDWIN (1919): Das Kriegsvermessungswesen im Dienste der Geographie. In: Petermanns Geographische Mitteilungen, H. 5/6, S. 81-89.
- FENSTERMAKER, LYNN K. (Hrsg.) (1994): Remote Sensing Thematic Accuracy Assessment: A Compendium. Maryland/USA.
- FENT, L., R. J. HALL & R. K. NESBY (1995): Aerial Films for Forest Inventory: Optimizing Film Parameters. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 61, No. 3, S. 281-289.
- FISCHER, J. & A. V. KIENLIN (1987): Korrektur von Störfaktoren bei der Waldschadenserfassung unter Verwendung digitalisierter Farbinfrarot-Luftbilder. In: Bildmessung und Luftbildwesen, 55. Jg., H. 2, S. 50-59.
- FLAGGE, F. (Hrsg.) (1957): Handbuch der Physik. Berlin u.a.

- FLEMING, M. D. (1975): Computer Aided Analysis of Landsat MSS Data: A Comparison of Three Approaches Including a Modified Clustering Approach. LARS Information Note 072475 Indiana/USA.
- FORD, GARY E. & CLAUDIO I. ZANELLI (1985): Analysis and Quantification of Errors in the Geometric Correction of Satellite Images In: FENSTERMAKER, LYNN K. (Hrsg.) (1994): Remote Sensing Thematic Accuracy Assessment: A Compendium. Maryland/USA, S. 35-44.
- FUGMANN, H., M. JANOTTA & W. SCHMITT-RENNEKAMP (1987): Gutachten zum Biomonitoringprogramm Berlin - Teil Flora und Fauna. Im Auftrag des Senators für Stadtentwicklung und Umweltschutz, Abt. II, Landesbeauftragter für Naturschutz und Landschaftspflege. Berlin.
- GAHEGAN, MARK & MANFRED EHLERS (2000): A framework for the modelling of uncertainty between remote sensing and geographic information systems. In: ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing, Vol. 55, S. 176-188.
- GENKINGER, R., M. NICKEL-ROHRBECK & J. WERKING-RADTKE (1984): Luftbild und Computer im Dienst der Landschaftsplanung. Daten über Landschaftsstruktur und Flächennutzung ergänzen Biotopkartierung. In: LÖLF-Mitteilungen, 9. Jg., H. 2, S. 32-37.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT (Hrsg.) (1975/1990): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:100 000 mit Erläuterungen zu Blatt C4306 Recklinghausen und C4310 Münster. Krefeld.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT (Hrsg.) (1987): Bodenkarten von Nordrhein-Westfalen 1:50 000, Blatt L4308 Recklinghausen. Krefeld.
- GEOSYSTEMS (Hrsg.) (1999): ATCOR2 for ERDAS IMAGINE. User Manual. München.
- GERLACH, JÜRGEN & ADRIAN HOPPENSTEDT (1999): Die strategische Umweltprüfung (SUP). Konsequenzen für Bedarfs-, Verkehrsentwicklungs-, Nahverkehrs- und Bauleitpläne. In: Naturschutz und Landschaftsplanung, 31. Jg., H. 11, S. 338-341.
- GIERLOFF-EMDEN, HANS GÜNTHER (1989): Fernerkundungskartographie mit Satellitenaufnahmen. Allgemeine Grundlagen und Anwendungen. In: ARNBERGER, ERIK (Hrsg.): Die Kartographie und ihre Randgebiete, Bd. IV/1. Wien.
- GOLDBERG, M., D. G. GOODENOUGH, M. ALVO & G. M. KARAM (1985): A hierarchical expert system for updating forestry maps with Landsat data. In: Proceedings of the IEEE, Vol. 73, No. 6, S. 1054-1063.
- GOLDSMITH, F. B. (Hrsg.) (1991): Monitoring for Conservation and Ecology. New York u.a.
- GONG, P. (1993): Change Detection using Principal Component Analysis and Fuzzy Set Theory. In: Canadian Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 1, S. 22-29.

- GONG, JIANYA & DEREN LI (2000): Object-oriented and Integrated Spatial Data Model for Managing Image, DEM and Vector Data. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 66, No. 5, S. 619-623.
- GONZALES, RAFAEL C. & RICHARD E. WOODS (1993): Digital Image Processing. Massachusetts, California, New York u. a.
- GOODENOUGH, B. F., M. GOLDBERG, G. PLUNKETT & J. ZELEK (1987): An Expert System for Remote Sensing. In: IEEE Trans. on Geoscience and Remote Sensing, Vol. GE-25, No. 3, S. 349-359.
- GÖPFERT, WOLFGANG (1987): Raumbezogene Informationssysteme. Datenerfassung, Verarbeitung, Integration, Ausgabe auf der Grundlage digitaler Bild- und Kartenverarbeitung. Karlsruhe.
- GRAHAM, RON (1998): Digital Imaging. Scotland, UK.
- GRAY, A. & P. STOKOE (1988): Knowledge-Based or Expert Systems and Decision Support Tools for Environmental Assessment and Management. Final Report for the Federal Environmental Assessment Review Office. Halifax/Canada.
- GUERRA, F., H. PUIG & R. C. CHAUME (1998): The forest-savanna dynamics from multi-date Landsat-TM data in Sierra Parima, Venezuela. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 11, S. 2061-2075.
- GÜNTHER, OLIVER & WOLF-FRITZ RIEKERT (Hrsg.) (1992): Wissensbasierte Methoden zur Fernerkundung der Umwelt. Karlsruhe.
- HAANTJES, H. A. (Hrsg.) (1970): Lands of Goroka-Mount Hagen Area, Papua-New Guinea. Land Research Series No. 27.
- HABER, WOLFGANG et al. (1993): Entwicklung von Methoden zur Beurteilung von Eingriffen nach § 8 Bundesnaturschutzgesetz. Baden-Baden.
- HÄME, THOMAS, ISTVAN HEILER & JESUS SAN MIGUEL-AYANZ (1998): An unsupervised change detection and recognition system for forestry. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 6, S. 1079-1099.
- HÄME, THOMAS & MARKKU RANTASUO (1988): Shuttered Camera - Aerial Color Video Imaging in the Visible and Near Infrared. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 54, No. 12, S. 1735-1738.
- HAKES, WILFRIED (1996): Multivariate Ordinationsmethoden zur Analyse von Veränderungen in der Vegetationsstruktur. In: Natur und Landschaftsplanung, 28. Jg., H. 1, S. 12-19.

- HALM, KAY (1986): Photographische Weltraumaufnahmen und ihre Eignung zur thematischen und topographischen Kartierung, zur Umweltverträglichkeitsprüfung und zur wasserwirtschaftlichen Rahmenplanung. Dargestellt am Beispiel der Metric-Camera-Aufnahme des Rhône-Deltas. Münchener Geographische Abhandlungen, Bd. 35.
- HARDY, COLIN C. & ROBERT E. BURGAN (1999): Evaluation of NDVI for Monitoring Live Moisture in Three Vegetation Types of the Western U.S. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 65, No. 5, S. 603-610.
- HARRIS, A. J., R. A. VAUGHAN & D. A. ROTHERY (1995): Volcano detection and monitoring using AVHRR data: the krafla eruption, 1984. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 16, No. 6, S. 1001-1020.
- HARRIS, PAUL M. & STEPHEN J. VENTURA (1995): The Integration of Geographic Data with Remotely Sensed Imagery to Improve Classification in an Urban Area. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 61, No. 8, S. 993-998.
- HARTMANN, G. (1984): Waldschadenserfassung durch Infrarot-Farbluftbilder in Niedersachsen 1983. In: Der Forst- und Holzwirt, 39. Jg., H. 6, S. 131-142.
- HAUFF, V. (1987): Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung. Greven.
- HAUSHERR, HANNES & MICHAEL JUNGMEIER (1999): Ökosystem-Monitoring im Nationalpark Hohe Tauern - Spezielle Aspekte des räumlichen und zeitlichen Erhebungs-Designs. In: BLASCHKE, THOMAS (Hrsg.): Umweltmonitoring und Umweltmodellierung: GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Entwicklung. Heidelberg, S. 39-46.
- HAYDN, R., S. SLIVENSKY & T. WINTGES (1985): Interpretation des Vitalitätszustandes von Bäumen aus digitalisierten Farbinfrarot-Aufnahmen. In: Das Gartenamt, 34. Jg., H. Oktober, S. 687-695.
- HEHL-LANGE, SIGRID & ECKART LANGE (1999): Planen mit virtuellen Braunkohlendlandschaften. Ein GIS-gestütztes Landschaftsmodell für den Tagebau Jänischwalde. In: Naturschutz und Landschaftsplanung, 31. Jg., H. 10, S. 301-307.
- HEIDINGSFELD, N. (1993): Neue Konzepte zum Luftbildeinsatz für großräumig permanente Waldzustandserhebungen und zur bestandesbezogenen Kartierung flächenhafter Waldschäden. Mitteilungen aus der Forstlichen Versuchsanstalt Rheinland-Pfalz, Nr. 23.
- HEINRICHSBAUER, A. (1936): Die Wasserwirtschaft im Rheinisch-Westfälischen Industriegebiet. Essen.
- HELLAWELL, J. M. (1991): Development of a rationale for monitoring. In: GOLDSMITH, F. B. (Hrsg.): Monitoring for Conservation and Ecology. New York, S. 1-14.

- HELLER, ROBERT C. (1971): Color and false color photography: its growing use in forestry. In: AKCA, A. et al.: Application of Remote Sensors in Forestry. Joint Report by Working Group. Freiburg, S. 37-55.
- HERGET, JÜRGEN (1997): Die Flußentwicklung des Lippetal. Bochumer Geographische Arbeiten, Bd. 62.
- HERMAN, JOHN D., JANE E. WAITES, RANDAL M. PONITZ & PAUL ETZLER (1994): A Temporal and Spatial Resolution Remote Sensing Study of a Michigan Superfund Site. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 60, No. 8, S. 1007-1017.
- HERTEL, DIRK, EBERHART PELZ & CAROLA WIENHOLD (1992): Standardisierung von Farbinfrarot-Luftbildern als Grundlage für das Monitoring von Waldschäden. In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, H. 6, S. 181-189.
- HESS, GÜNTHER (1992): Der RESEDA Assistant: Implementierung eines wissensbasierten Assistenzsystems für die Verarbeitung von Fernerkundungsdaten. In: GÜNTHER, OLIVER & WOLF-FRITZ RIEKERT (Hrsg.): Wissensbasierte Methoden zur Fernerkundung der Umwelt. Karlsruhe, S. 37-54.
- HESSING, CHRISTIAN (1998): Ein operationelles Verfahren zur Korrektur des reliefbedingten Einstrahlungseffektes in Satellitenbildern. In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, H. 5-6, S. 157-164.
- HILDEBRANDT G. (1957): Zur Frage des Bildmaßstabes und der Filmauswahl bei Luftbildaufnahmen für forstliche Zwecke. In: Archiv für das Forstwesen, 6. Jg., H. 4, S. 285-306.
- HILDEBRANDT, G. (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie. Heidelberg.
- HILDEBRANDT, G. & H. KENNEWEG (1970): The truth about false colour film - a german view. In: Photogrammetric Record, Vol.6, No. 35, S. 446-451.
- HILDEN, D. (1975): Hydrogeologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:100 000, Erläuterungen zu Blatt C4306 Recklinghausen. Krefeld.
- HILDEN, H. D. & K. H. SUCHAN (1974): Neue Untersuchungen über die Verbreitung, Mächtigkeit und Grundwasserführung der Haltener Sandfazies. Fortschritte der Geologie Rheinland und Westfalen, Bd. 20.
- HILL, J. & B. STURM (1991): Radiometric correction of multitemporal Thematic Mapper Data for the use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 12, No. 7, S. 1471-1491.
- HÖHLE, JOACHIM (1996): Experiences with the Production of Digital Orthophotos. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 10, S. 1189-1194.
- HOFFER, R. M. & C. J. JOHANNSEN (1969): Ecological Potentials in Spectral Signature Analysis. In: JOHNSON, P. L. (Hrsg.): Remote Sensing in Ecology. Athens/Georgia, S. 17-29.

- HOLOPAINEN, MARKUS & GUANGXING WANG (1998): The calibration of digitized aerial photographs for forest stratification. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 4, S. 677-696.
- HOOD, LADNER & CHAMPION (1989): Image Processing Techniques for Digital Orthophotoquad Production. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 55, No. 9, S. 1323-1329.
- HOWARD, J. A. (1991): *Remote Sensing of forestry resources*. London.
- HÜBLER, KARL-HERMANN & ULRIKE WEILAND (Hrsg.) (1997): *Bausteine für eine nachhaltige Raumentwicklung in Brandenburg und Berlin*. Berlin.
- HUGGETT, RICHARD JOHN (1997): *Environmental Change - the Evolving Ecosphere*. London, New York.
- HURCOM, S. J. & A. R. HARRISON (1998): The NDVI and spectral decomposition for semi-arid vegetation abundance vegetation. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 16, S. 3109-3125.
- HUSAK, GREGORY J., BRIAN C. HADLEY & KENNETH C. MCGWIRE (1999): Landsat Thematic Mapper Registration Accuracy and its Effects on the IGBP Validation. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 65, No. 9, S. 1033-1039.
- HUTCHINSON, C. F. (1982): Techniques for combining Landsat and ancillary data for digital classification improvement. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 48, No. 1, S. 123-130.
- JENSEN, JOHN R. (1996): *Introductory digital image processing: a remote sensing perspective*. 2. Aufl., London u.a.
- JESSEL, B. (1996): Erfolgskontrollen im Rahmen der Eingriffsregelungen. Notwendigkeit und Anforderungen. In: *UVP-Report*, H. 5, S. 197-201.
- JOHNSON, P. L. (Hrsg.) (1969): *Remote Sensing in Ecology*. Athens/Georgia.
- JOUVENTIN, P. & H. WEINMERSKIRCH (1990): Satellite tracking of wandering Albatrosses. In: *Nature*, No. 343, S. 746-748.
- JÜRGENS, CARSTEN (1997): The modified normalized vegetation index (mNDVI) - a new index to determine frost damages in agriculture based on Landsat TM data. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 18, No. 17, S. 3583-3594.
- JÜRGENS, CARSTEN (1998): Satellitenfernerkundung - Ein Überblick über derzeitige und zukünftige Aufnahmeinstrumente. In: *Geoökodynamik*, H. XIX, S. 119-137.
- KALENSKY, ZDENEK (1996): Regional and Global Land Cover Mapping and Environmental Monitoring by Remote Sensing. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXI, Teil B 4 Kommission IV. Vienna/Austria, S. 413-426.

- KATTENBORN, G. (1991): Atmosphärenkorrektur von multispektralen Satellitendaten für forstliche Anwendungen. Dissertation Universität Freiburg. Freiburg.
- KAUFMAN, YORAM, J. (1985): The Atmospheric Effect on the Separability of Field Classes Measured from Satellites. In: Remote Sensing of Environment, No. 18, S. 21-34.
- KAUTH, R. J. & G. S. THOMAS (1976): The tasseled-cap - a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by Landsat. In: Proceedings of the Symposium Machine Proc. of Remotely Sensed Data, Purdue University. West Lafayette, S. 41-51.
- KAUTZLEBEN, HEINZ, HEINER BARSCH & RUDOLF KRÖNERT (1990): Geofernerkundung im Rahmen des Interkosmos-Programms. Geographische Aspekte einer interdisziplinären Forschungskoooperation. In: Petermanns Geographische Mitteilungen, H. 1, S. 55-65.
- KLEUTER, INGRID (1997): Der Einsatz von Reihenmeßbildern in Umweltverträglichkeitsstudien. Diplomarbeit Universität Bochum, unveröffentlicht.
- KLIMES, D. & D. I. ROSS (1993): A Continuous Process for the Development of Kodak Aerochrome Infrared Film. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 59, No. 2, S. 209-213.
- KLINK, HANS-JÜRGEN (1996): Das Geographische Seminar: Vegetationsgeographie. 2. Aufl., Braunschweig.
- KLOER, BRIAN R. (1994): Hybrid Parametric/Non-Parametric Image Classification Paper presented at the ACSM-ASPRS Annual Convention, April 1994. Reno/Nevada.
- KNEIZYS, F. X. et al. (1988): Users Guide to LOWTRAN 7, Report AFGL-TR-88-0177 Bedford/Massachusetts.
- KNIPLING, EDWARD B. (1969): Leaf reflectance and Image formation on Color Infrared Film. In: JOHNSON, P. L. (Hrsg.): Remote Sensing in Ecology. Georgia/USA, S. 17-29.
- KÖLBL, O. & U. BACH (1996): Tone Reproduction of Photographic Scanners. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 6, S. 687-694.
- KOMMUNALVERBAND RUHRGEBIET, KVR (Hrsg.) (1985): Wuchsklimate des Ruhrgebiets und angrenzender Bereiche. Essen.
- KOMMUNALVERBAND RUHRGEBIET, KVR (Hrsg.) (1992): Synthetische Klimafunktionskarte Ruhrgebiet. Essen.
- KRAKHECKEN, M. (1939): Die Lippe. Arbeiten der geographischen Kommission 2. Münster.
- KRAMER, HERBERT J. (1994): Observation of the Earth and Its Environment. Survey of Missions and Sensors. 2. Aufl., Berlin.
- KRAUS, KARL (1990): Fernerkundung. Band 2: Auswertung photographischer und digitaler Bilder. Bonn.

- KUGLER, HANS & RONALD JÄNCKEL (1978): Zur geographischen Interpretation der Multi-spektralaufnahme „Süßer See“. In: Geographische Berichte, 2. Jg., H. 87, S. 99-111.
- KUTTLER, W. & D. SCHREIBER (1984): Stadt- und Geländeklimatologische Untersuchungen im südlichen Münsterland. Materialien zur Raumordnung aus dem Geographischen Institut der Ruhr-Universität Bochum, Bd. XXV.
- KWARTENG, A. Y. & P. S. CHAVEZ JR. (1998): Change detection study of Kuwait City and environs using multitemporal Landsat Thematic Mapper data. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 9, S. 1651-1662.
- LA PERRIERE, A. J., P. C. LENT, W. C. GASSAWAY & F. A. NODLER (1980): Use of Landsat data for moose habitat analysis in Alaska. In: Journal of Wildlife Management, Vol. 44, No. 4, S. 881-887.
- LAMBIN, ERIC F. (1996): Change Detection at Multiple Temporal Scales: Seasonal and Annual Variations in Landscape Variables. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 8, S. 931-938.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE & HÖHERE FORSTBEHÖRDE (Hrsg.) (1981): Forstbehördlicher und landwirtschaftlicher Fachbeitrag 156: Die forst- und landwirtschaftliche Struktur und ihre Entwicklungstendenzen im Raum Seengebiet Haltern/Kreis Recklinghausen. Recklinghausen.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE & HÖHERE FORSTBEHÖRDE (Hrsg.) (1985): Landwirtschaftlicher und forstbehördlicher Fachbeitrag 184: Die Struktur der Land- und Forstwirtschaft und deren Entwicklungsmöglichkeiten im Bereich des Landschaftsplanes Dorstener Ebene/Kreis Recklinghausen. Recklinghausen.
- LIEDTKE, C.-E., J. BÜCKNER, O. GRAM, S. GOWE & R. TÖNJES (1997): AIDA: A System for the knowledge based Interpretation of Remote Sensing Data. In: 3rd Int. Airborne Remote Sensing Conference and Exhibition. Copenhagen/Denmark, S. 313-320.
- LIEDTKE, H. & J. MARCINEK (Hrsg.) (1994): Physische Geographie Deutschlands. 2. Aufl., Gotha.
- LIGHT, DONALD L. (1996): Film Cameras or Digital Sensors? The Challenge Ahead for Aerial Imaging. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 3, S. 285-291.
- LILLESAND, THOMAS M. & RALPH W. KIEFER (1994): Remote Sensing and Image Interpretation. 3. Aufl., New York, Chichester u.a.
- LILLESAND, THOMAS M. & RALPH W. KIEFER (1999): Remote Sensing and Image Interpretation. 4. Aufl., New York.
- LIPPEVERBAND (Hrsg.) (1988): Lippekonzept. Karten und Text. Dortmund.
- LIPPEVERBAND (Hrsg.) (1995): Lippeauenprogramm. unveröffent. Entwurf, Dortmund.
- LITTMANN, THOMAS, MONIKA BÜRGER & JÜRGEN STEINRÜCKE (1994): Physikalische Grundlagen und Übungen zur Klimatologie. 2. Aufl., Bochum.

- LOFFLER, E. & C. MARGULES (1980): Wombats detected from space. In: Remote Sensing of Environment, No. 9, S. 47-56.
- LUMAN, DONALD E., CHRISTOPHER STOHR & LETA HUNT (1997): Digital Reproduction of Historical Aerial Photographic Prints for Preserving a Deteriorating Archive. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 63, No. 10, S. 1171-1179.
- LUNETTA, ROSS S. & CHRISTOPHER D. ELVIDGE (Hrsg.) (1998): Remote sensing change detection: environmental monitoring methods and applications. Michigan/USA.
- LYON, JOHN G., DING YUAN, ROSA S. LUNETTA & CHRIS D. ELVIDGE (1998): A Change Detection Experiment Using Vegetation Indices. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 64, No. 2, S. 143-150.
- MAAS, DIETER (1999): Umweltmonitoring - Biomonitoring: Begriffsdefinitionen. In: BLASCHKE, THOMAS (Hrsg.): Umweltmonitoring und Umweltmodellierung: GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Entwicklung. Heidelberg, S. 47-54.
- MAAS, DIETER & JÖRG PFADENHAUER (1994): Effizienzkontrollen von Naturschutzmaßnahmen. Fachliche Anforderungen im vegetationskundlichen Bereich. In: BLAB, J., E. SCHRÖDER & W. VÖLKI (Hrsg.): Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz. H. 40: Effizienzkontrollen im Naturschutz. Bonn Bad-Godesberg. S. 25-50.
- MACLEOD, ROBB D. & RUSSEL G. CONGALTON (1998): A Quantative Comparison of Change Detection Algorithms for Monitoring Eelgrass from Remotely Sensed Data. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 64, No. 3, S. 207-216.
- MATHER, PAUL M. (Hrsg.) (1992): Terra-1: Understanding the Terrestrial Environment; the Role of Earth Observations from Space. London u. a.
- MATHER, PAUL M. (1993): Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction. Chichester, New York u.a.
- MATHER, PAUL M. (1999): Computer Processing of Remotely-Sensed Images. An Introduction. 2. Aufl., Chichester, New York u.a.
- MCKEOWN, D., A. WILSON & J. MCDERMOTT (1985): Rule-Based Interpretation of Aerial Imagery. In: IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 7, No. 5, S. 570-585.
- MEADOWS, DENNIS H. et al. (1972): Die Grenzen des Wachstums. Stuttgart.
- MEIENBERG, P. (1966): Die Landnutzungskartierung nach Pan-, Infrarot- und Farbluftbildern. Münchener Studien zur Sozial- und Wirtschaftsgeographie, Bd. 1.
- MEINEL, GOTTHARD, CLAUDIA KNAPP & EVA-MARIA TITTEL (Hrsg.) (1997): Bestimmung von Flächennutzungsänderungen mittels Satellitenbilddaten - Methodische Untersuchungen am Beispiel der Stadt-Umland-Regionen Dresden und Leipzig. IÖR-Schrift, H. 21.

- MEYNEN, E. et al. (1962): Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands. Bad Godesberg.
- MICKELSON, JR., JOHN G., DANIEL L. CIVCO & JOHN A. SILANDER JR. (1998): Delineating Forest Canopy Species in the Northeastern United States Using Multi-Temporal TM Imagery. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 64, No. 9, S. 891-904.
- MILLER, A. B., E. S. BRYANT & R. W. BIRNIE (1998): An analysis of Land Cover Changes in the Northern Forest of New England. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 2, S. 245-265.
- MINO, N., G. SAITO & S. OGAWA (1998): Satellite monitoring of changes in improved grassland management. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 3, S. 439-452.
- MITTENZWEY, K.-H., G. SINN, N. ROOF & S. HARSDORF (1997): An improved lidar method for monitoring surface waters: experiments in the laboratory. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, No. 11, S. 2271-2276.
- MÖLLER, F. (1957): Strahlung in der unteren Atmosphäre. In: FLAGGE, F. (Hrsg.): Handbuch der Physik. Berlin u.a.
- MOLLER-JENSEN, LASSE (1990): Knowledge-Based Classification of an Urban Area using Texture and Context Information in Landsat-TM Imagery. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 56, No. 6, S. 899-904.
- MORAN, M. S., R. D. JACKSON, P. N. SLATER & P. M. TEILLET (1992): Evaluation of simplified procedures for retrieval of land surface reflectance factors from satellite sensor output. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 41, S. 169-184.
- MÜLLER-WILLE, W. (1966): Bodenplastik und Naturräume Westfalens. Spieker Nr. 14.
- MURTHA, PETER A. & RAOUL J. WIART (1989): Cluster Analysis of Pine Crown Foliage Patterns Aid Identification of Mountain Pine Beetle Current-Attack. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 55, No. 1, S. 83-86.
- NIEMANN, H., G. SAGERER, S. SCHRÖDER & F. KUMMERT (1990): ERNEST: A Semantic Network System for Pattern Understanding In: IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 12, No. 9, S. 883-905.
- NIGGEMANN, JOSEF (1981): Die Veränderungen im Acker-Grünland-Verhältnis aus ökonomischer und ökologischer Sicht. In: RUB & LANDESAMT FÜR AGRARORDNUNG NRW (Hrsg.): Symposium über Landespflege und Flurbereinigung, 26.10.1981 Bochum. S. 35-55.
- NOLL, HANS-PETER (1987): Modelluntersuchungen für umweltfreundliche Konfliktlösungen bei zu erwartenden Bodensenkungen am Beispiel des Raumes Olfen. Dissertation Universität Bochum, als Manuskript gedruckt.

- NUTZ, PETER (1992): Statistische Methoden zur Unterstützung der überwachten Klassifizierung von Fernerkundungsdaten. In: GÜNTHER, OLIVER & WOLF-FRITZ RIEKERT (Hrsg.): Wissensbasierte Methoden zur Fernerkundung der Umwelt. Karlsruhe, S. 147-170.
- OESTEN, KUNTZ & GROSS (Hrsg.) (1991): Fernerkundung in der Forstwirtschaft; Stand und Entwicklungen. Karlsruhe.
- ORTHABER, HARALD (1997): Beleuchtungsmodell und topographische Korrekturfehler durch unexakte Sonnenpositionsdaten. In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, H. 1, S. 11-21.
- ORTHABER, HARALD J. (1999): Bilddatenorientierte atmosphärische Korrektur und Auswertung von Satellitenbildern zur Kartierung vegetationsdominierter Gebiete. Kartographische Bausteine Bd. 16, TU Dresden.
- PEITHMANN, ORTWIN (1996): Monitoring - nicht Modebegriff, sondern Perspektive. Eine Einführung in das Thema. In: UVP-Report, H. 5, S. 191-193.
- PERRY, CHARLES JR. & LYLE F. LAUTENSCHLAGER (1984): Functional Equivalence of Spectral Vegetation Indices. In: Remote Sensing of Environment, Vol. 33, No. 14, S. 169-182.
- PETRIE, GORDON (1997): Developments in digital photogrammetric systems for topographic mapping applications. In: ITC Journal, H. 2, S. 121-135.
- PHILIPSON, W. R., M. EUGENIA, B. U. A. INGRAM & V. L. WILLIAMS (1988): Land-Cover Monitoring with SPOT for Landfill Investigations. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 54, No. 2, S. 223-228.
- PILLMANN, WERNER & JOHANN KLAR (1995): Biotopmonitoring: Systementwicklung zur Erfassung des städtischen Grüninventars. In: Space and time in environmental information systems, 9th International Symposium on Computer Science for Environmental Protection '95. GI-Fachauschuß 4.6 "Informatik für den Umweltschutz". Marburg, S. 543-550.
- PINDER III., JOHN E. & KENNETH W. MCLEOD (1999): Indications of Relative Drought Stress in Loblolly Pine from Thematic Mapper Data. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 65, No. 4, S. 495-501.
- PIRCHL, PETER, PHILIPP HIRTZ, MARTIN SUTER & DANIEL HÜESCH (1997): Integration von hochauflösenden Fernerkundungs- und Geländemodell Daten für die Landschaftsvisualisierung. In: Geographica Helvetica, H. 1, S. 21-26.
- PLACHTER, HARALD (1991): Biologische Dauerbeobachtung in Naturschutz und Landschaftspflege. In: Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege (Hrsg.): Laufener Seminarbeiträge 7/91. S. 7-29.

- POHL, C. (1999): Tools and Methods for Fusion of Images of different spatial resolution. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Vol.32, P. 7-4-3 W6. Valladolid/Spain.
- POHL, C. & J. L. VAN GENDEREN (1998): Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 5, S. 823-854.
- POLLOCK, R. B. & E. T. KANEMASU (1979): Estimating Leaf-Area Index of Wheat with Landsat Data. In: Remote Sensing of Environment, No. 8, S. 307-312.
- POPE, PAUL, ED VAN EECKHOUT & CHERYL ROFER (1996): Waste Site Characterization through Digital Analysis of Historical Aerial Photographs. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 62, No. 12, S. 1387-1394.
- PUREVDORJ, TS., R. TATEISHI, T. ISHIYAMA & Y. HONDA (1998): Relationships between percent vegetation cover and vegetation indices. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 18, S. 3519-3535.
- RAMSEY III., E. W. (1995): Monitoring flooding in coastal wetlands by using radar imagery and ground-based measurements. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 16, No. 13, S. 2495-2502.
- RATHORE, C. S. & R. WRIGHT (1993): Monitoring environmental impacts of surface coal mining. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 14, No. 6, S. 1021-1042.
- REES, W. G. & M. WILLIAMS (1997): Monitoring changes in land cover induced by atmospheric pollution in the Kola Peninsula, Russia using Landsat-MSS data. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 18, No. 8, S. 1703-1723.
- REIS, LUDWIG, GERHARD WAGNER, HEIDELORE FIEDLER & OTTO HUTZINGER (Hrsg.) (1993): Ecoinforma 92: 2. Internationale Tagung und Ausstellung über Umweltinformation und Umweltkommunikation. Biomonitoring & Umweltprobenbanken, Umweltdatenbanken & Informationssysteme, Ökometrie, Qualitätssicherung. Eco-Inforna, Vol. 4.
- RHEIN, ULRICH (1996): Mooranalyse und -monitoring durch operationellen Einsatz von Satellitenfernerkundung. In: UVP-Report, H. 5, S. 214-216.
- RICHARDS, JOHN A. (1993): Remote Sensing digital image analysis: an introduction. 2. Aufl., New York, Berlin.
- RICHARDSON, ARTHUR J. & JAMES H. EVERITT (1992): Using Spectral Vegetation Indices to estimate Rangeland Productivity. In: Geocarto International, No. 1, S. 63-69.
- RICHTER, R. (1996): A spatially adaptive fast atmospheric correction algorithm. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 17, No. 6, S. 1201-1214.
- RIEKERT, WOLF-FRITZ (1992): Fernerkundung als wissensbasierte Verarbeitung von geographischer Information. In: GÜNTHER, OLIVER & WOLF-FRITZ RIEKERT (Hrsg.): Wissensbasierte Methoden zur Fernerkundung der Umwelt. Karlsruhe, S. 9-36.

- ROHBECK, ULF (1999): Einsatz der Infrarottechnik als innovatives Verfahren zur Erfassung umwelt- und energiewirtschaftlich relevanter Daten. GUGM-Tagungsprotokoll 15. bis 16.09.1999. München (CD-ROM).
- ROSENBLATT, F. (1958): The perceptron: a probabilistic model for information storage and organization in the brain. In: Psychological Review, No. 65, S. 386-408.
- RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM & LANDESAMT FÜR AGRARORDNUNG NRW (Hrsg.) (1981): Symposium über Landespflege und Flurbereinigung, 26.10.1981. Bochum.
- RUMELHART, D. E., HINTON, G. E. & R. J. WILLIAMS (1986): Learning international representations by error propagation Aus: RUMELHART, D. E. & J. L. MCCLELLAND (Hrsg.): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructures of Cognition, Vol. 1 Cambridge. S. 318-362.
- RUMELHART, D. E. & J. L. MCCLELLAND (Hrsg.) (1986): Parallel Distributed Processing: Explorations in the Microstructures of Cognition, Vol. 1 Cambridge.
- RUNGE, KARSTEN (1998): Umweltverträglichkeitsuntersuchung: Internationale Entwicklungstendenzen und Planungspraxis. Berlin, Heidelberg.
- RUNKEL, MARTIN (1987): Digitale Oberflächenmodelle zur Spektralsignaturforschung. In: DLR (Hrsg.): Tagungsband des Statusseminars Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung. Oberpfaffenhofen/München. S. 311-327.
- SCHÄFER, KURT (1997): Zum integrierten Konzept der IVU-Richtlinie. In: Umwelt und Planungsrecht, H. 11/12, S. 444-448.
- SCHALLER, JÖRG (1989): Geographische Informationssysteme für die Ökosystemforschung und Umweltbeobachtung. In: Geo-Informationssysteme, H. 4, S. 7-12.
- SCHIEFFER, F. & P. SCHACHTSCHABEL (1989): Lehrbuch der Bodenkunde. 12. Aufl., Stuttgart.
- SCHERRER, H. U., H. GANTSCHI & P. HAUENSTEIN (1990): Flächendeckende Waldzustandserfassung mit Infrarot-Luftbildern. Bericht 318 der Eidgenössischen Anstalt für das Forstliche Versuchswesen Schweiz.
- SCHNEIDER, SIEGFRIED (1984): Angewandte Fernerkundung: Methoden und Beispiele. Hannover.
- SCHNEIDER-SLIWA, RITA, DANIEL SCHAUB & GERHARD GEROLD (1999): Angewandte Landschaftsökologie: Grundlagen und Methoden. Heidelberg.
- SCHOENEBERG, JÖRG (1993): Umweltverträglichkeitsprüfung. Praxis des Verwaltungsrechts. München.
- SCHÖNTHALER, KONSTANZE, HERIBERT F. KERNER, JOHANN KÖPPEL & L. SPANAU (1997): Konzeption für eine ökosystemare Umweltbeobachtung - wissenschaftlicher Ansatz im Auftrag des Umweltbundesamtes. Texte 32/97. Bonn.

- SCHÖNTHALER, KONSTANZE & JOHANN KÖPPEL (1999): Modellhafte Umsetzung der ökosystemaren Umweltbeobachtung in der Rhön als Bestandteil des Konzeptes "Ökologische Umweltbeobachtung des Bundes und der Länder". In: BLASCHKE, THOMAS (Hrsg.): Umweltmonitoring und Umweltmodellierung: GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Entwicklung. Heidelberg, S. 23-38.
- SCHUBERT, RUDOLF (1991): Bioindikatoren in terrestrischen Ökosystemen. 2. überarb. Auflage, Jena.
- SCHWAIBERGER, REINHART (1999): Einsatz der Bildverarbeitung im Precision Farming - Stand der Technik. GUGM-Tagungsprotokoll 15.-16.09.1999. München (CD-ROM).
- SCHWARZKOPF, UTA, HEINER BARSCH, SIBYLLE ITZEROTT, KLAUS KADEN & KERSTIN HOFMANN (1992): Zur Erkennung von Waldschäden aus digitalen Fernerkundungsdaten. Potsdamer Geographische Forschungen, Bd. 2.
- SEGER, MARTIN & PETER MANDL (1994): Satellitenbildinterpretation und ökologische Landschaftsforschung - ein konzeptiver Ansatz und die Fallstudie Peloponnes. In: Erdkunde, H. 48, S. 34-47.
- SHAFFER, G. (1976): A Mathematical Theory of Evidence. Princeton/New Jersey.
- SHOKR, M. E., B. RAMSAY & J. C. FALKINGHAM (1996): Operational use of ERS-1SAR images in the canadian ice monitoring programme. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 17, No. 4, S. 667-682.
- SINGH, ASHBINDU (1989): Digital change detection techniques using remotely-sensed data. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 10, No. 6, S. 989-1003.
- SKIDMORE, ANDREW K. (1989): An Expert System Classifies Eucalypt Forest Types using Thematic Mapper Data and a Digital Terrain Model. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 55, No. 10, S. 1449-1464.
- SLONECKER, TERRENCE E., DENICE M. SHAW & THOMAS M. LILLESAND (1998): Emerging Legal and Ethic Issues in Advanced Remote Sensing Technology. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 64, No. 6, S. 589-595.
- SNOOK, PAUL W., KENNETH C. WINTERBERGER, NORMAN E. MERRITT & RAYMOND L. CZAPLEWSKI (1987): Comparison between Digital and Manual Interpretation of High Altitude Aerial Photographs. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 53, No. 5, S. 531-534.
- SPELLERBERG, J. F. (1991): Monitoring ecological change. Cambridge/UK.
- SPITZER, D., R. LAANE & J. N. ROOZEKRANS (1990): Pollution monitoring of the North Sea using NOAA/AVHRR imagery. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 11, No. 6, S. 967-977.
- SRU (DER RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN) (1991): Allgemeine ökologische Umweltbeobachtung. Stuttgart.

- SRU (DER RAT VON SACHVERSTÄNDIGEN FÜR UMWELTFRAGEN) (1996): Ein Mehrstufenmodell zur Festlegung von Umweltstandards - zur Umsetzung einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung. In: Zeitschrift für angewandte Umweltforschung, 9. Jg., H. 2, S. 166-172.
- STAMS, WERNER (1972): Vom Luftbild zum Weltraumbild. In: Geografische Berichte, H. 64/65, S. 257-292.
- STEINER, DIETER (1961): Die Jahreszeit als Faktor bei der Landnutzungsinterpretation aus panchromatischen Luftbildern. Landeskundliche Luftbildauswertung im Mitteleuropäischen Raum, H. 5.
- STIBIG, H. J. & R. BALTAKE (1991): NOAA AVHRR Satellitenaufnahmen für großräumige Waldflächenerfassung. In: Fernerkundung in der Forstwirtschaft, S. 258-265.
- STOCK, M. (1987): AI and expert systems: an overview. In: AI Applications in Natural Resource Management, Vol. 1, No. 1, S. 9-18.
- STÖHR, MANFRED (1989): Biomonitoring. In: Landschaft und Stadt, 21. Jg., H. 4, S. 121-132.
- STRUCKMEIER, W. (1990): Wasserhaushalt und Hydrologische Systemanalyse des Münsterländer Beckens. Schriftenreihe des Landesamt für Wasser und Abfall NW, Bd. 45.
- SU, ZHONGBO (1996): Remote Sensing Applied to Hydrology: The Sauer River Basin Study. Schriftenreihe Hydrologie/Wasserwirtschaft Ruhr-Universität Bochum. Bochum.
- SUKOPP H., K. SEIDEL & R. BÖCKER (1986): Bausteine für den Naturschutz. In: Berichte der Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege, H. 10, S. 27-39.
- SUNAR, F. (1998): An Analysis of changes in a multi-date data set: a case study in the Ikitelli area, Istanbul, Turkey. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 2, S. 225-235.
- SWAIN, PHILIP H. & SHIRLEY M. DAVIS (Hrsg.) (1978): Remote Sensing: The Quantitative Approach. New York, London u.a.
- SWITZER, P., W. S. KOWALIK & R. J. P. LYON (1981): Estimation of atmospheric path radiance by the covariance matrix method. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 47, No. 10, S. 1469-1476.
- TAHU, GEORGE J., JOHN C. BAKER & KEVIN M. O'CONNELL (1998): Expanding global access to civilian and commercial remote sensing data: implications and policy issues. In: Space Policy, No. 14, S. 179-188.
- TALBOT, S. S. & C. J. MARKON (1986): Vegetation mapping of Nowitna National Wildlife Refuge, Alaska, using Landsat MSS digital data. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 52, No. 6, S. 791-799.
- TANRÉ, D. et al. (1986): Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum. Toulouse/Frankreich.

- THOMPSON, D. G., G. H. KLASSEN & J. CIHLAR (1980): Caribon habitat mapping in the southern district of Keewain, N.W.T.: An application of digital Landsat data. In: *Journal of Applied Ecology*, No. 17, S. 125-138.
- TODD, STELL W., ROGER M. HOFFER & D. G. MILCHUNAS (1998): Biomass estimation on grazed and ungrazed rangelands using spectral indices. In: *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 19, No. 3, S. 427-438.
- TODD, STELL W. & ROGER M. HOFFER (1998): Responses of Spectral Indices to Variations in Vegetation Cover and Soil Background. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 64, No. 9, S. 915-921.
- TOM, C. H. & L. D. MILLER (1980): Forest site index mapping and modelling. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 46, No. 2, S. 1385-1596.
- TRAUTMANN, WERNER (1972): Vegetation (potentielle natürliche Vegetation). In: *AKADEMIE FÜR RAUMFORSCHUNG UND LANDESPLANUNG NRW (Hrsg.): Deutscher Planungsatlas, Lieferung 3, Bd. 1. Düsseldorf.*
- TREITZ, PAUL & PHILIP HOWARTH (2000): Integrating Spectral, Spatial and Terrain Variables for Forest Ecosystem Classification. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 66, No. 3, S. 305-317.
- TRINDER, J. C. (1987): Measurements on Digitized Hardcopy Images. In: *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 53, No. 3, S. 315-321.
- TROLL, CARL (1939): Luftbildplan und ökologische Bodenforschung. In: TROLL, CARL (Hrsg.) (1966): *Erdkundliches Wissen, H. 12: Ausgewählte Beiträge II: Luftbildforschung und Landeskundliche Forschung.* Wiesbaden, S. 1-69.
- TROLL, CARL (1942): Methoden der Luftbildforschung. In: TROLL, CARL (Hrsg.) (1966): *Erdkundliches Wissen, H. 12: Ausgewählte Beiträge II: Luftbildforschung und Landeskundliche Forschung.* Wiesbaden, S. 70-87.
- TROLL, CARL (1943): Fortschritte der wissenschaftlichen Luftbildforschung. In: TROLL, CARL (Hrsg.) (1966): *Erdkundliches Wissen, H. 12: Ausgewählte Beiträge II: Luftbildforschung und Landeskundliche Forschung.* Wiesbaden, S. 88-114.
- TROLL, CARL (1963): Geographische Luftbildinterpretation. In: TROLL, CARL (Hrsg.) (1966): *Erdkundliches Wissen, H. 12: Ausgewählte Beiträge II: Luftbildforschung und Landeskundliche Forschung.* Wiesbaden, S. 153-160.
- TROLL, CARL (Hrsg.) (1966): *Erdkundliches Wissen, H. 12: Ausgewählte Beiträge II: Luftbildforschung und Landeskundliche Forschung.* Wiesbaden.
- TUCKER, C. J. (1979): Red and Photographic Infrared Linear Combinations for Monitoring Vegetation. In: *Remote Sensing of Environment*, No. 8, S. 127-150.
- TÜXEN, R. (1956): Die potentielle natürliche Vegetation als Gegenstand der Vegetationskartierung. *Angewandte Pflanzensoziologie.* Stolzenau/Weser.

- UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1997a): Nachhaltiges Deutschland. Wege zu einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung. Berlin.
- UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1997b): Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit - ökologische Demonstrationsvorhaben: Texte 32/97: Konzeption für eine ökosystemare Umweltbeobachtung, wissenschaftlich-fachlicher Ansatz, Teil 1 und 2. Bonn.
- UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1999): Umweltforschungsplan 1999. In: Umwelt, H. 2, S. 2-8.
- VERBYLA, DAVID L. (1995): Satellite remote sensing of natural resources. New York.
- VDI (VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE), (Hrsg.) (1990): Richtlinie 3793: Messen von Vegetationsschäden am natürlichen Standort - Verfahren der Luftbilddaufnahme mit Color-Infrarot-Film. Düsseldorf.
- VERNA, K. S., R. K. SAXENA, T. N. HAJARE & S. C. RAMESH KUMAR (1998): Gram Yield estimation through SVI under variable soil management conditions. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 13, S. 2469-2476.
- VON KRIES, WULF (2000): Towards a new remote sensing order? In: Space Policy, No. 16, S. 163-166.
- VOLK, MARTIN & UTA STEINHARDT (1998): Integration unterschiedlich erhobener Datenebenen in GIS für landschaftsökologische Bewertungen im mitteldeutschen Raum. In: Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, H. 6, S. 349-362.
- WALSH, S. J. (1980): Coniferous tree species mapping using Landsat data. In: Remote Sensing of Environment, No. 9, S. 11-16.
- WARD, R. C., J. C. LOFTIS & G. B. MCBRIDE (1986): The "Data-rich but information poor" syndrome in water quality monitoring. In: Environmental Management, Vol. 10, No. 3, S. 291-297.
- WASHINGTON-ALLEN, R. A., R. D. RAMSEY, B. E. NORTON & N. E. WEST (1998): Change Detection of the effect of severe drought on subsistence agropastoral communities on the Bolivian Altiplano. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 7, S. 1319-1333.
- WEIERS, STEFAN (1999): Monitoring und Bewertung von Landschafts- und Biotopveränderungen in Schleswig-Holstein und Dänemark mit Methoden der Satellitenfernerkundung. In: BLASCHKE, THOMAS (Hrsg.): Umweltmonitoring und Umweltmodellierung: GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Entwicklung. Heidelberg, S. 83-90.
- WEILAND, ULRIKE (1996): Nachhaltige Entwicklung: Diskussionslinien und Implikationen für Umweltforschung und Umweltplanung In: HÜBLER, KARL-HERMANN & ULRIKE WEILAND (Hrsg.): Nachhaltige Entwicklung: Eine Herausforderung für die Forschung? Berlin, S. 1-23.

- WEISS, JOACHIM (1996): Landesweite Effizienzkontrollen in Naturschutz und Landschaftspflege. In: LÖBF-Mitteilungen, H. 2, S. 11-16.
- WEIZSÄCKER, ERNST ULRICH, AMORY B. LOVINS & HUNTER L. LOVINS (1997): Faktor vier. Doppelter Wohlstand - halbiertes Verbrauch. Der neue Bericht an den Club of Rome. München.
- WELCH, R., T. R. JORDAN & M. EHLERS (1985): Comparative Evaluations of the Geodetic Accuracy and Cartographic Potential of Landsat-4 and Landsat-5-Thematic Mapper Image Data. In: FENSTERMAKER, LYNN K. (Hrsg.) (1994): Remote Sensing Thematic Accuracy Assessment: A Compendium. Maryland/USA, S. 52-65.
- WENDEROTH, SONDRÄ, EDWARD YOST, RAJENDER KALIA & ROBERT ANDERSON (1974): Multispectral Photography for Earth Resources. New York.
- WERNER, CLAUDIA & HARTMUT KENNEWEG (1999): Aktualisierung und Ergänzung der Biotoptypen- und Nutzungstypenkartierung in Sachsen-Anhalt mit IRS-1C-Satellitendaten. In: BLASCHKE, THOMAS (Hrsg.): Umweltmonitoring und Umweltmodellierung. GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Entwicklung. Heidelberg, S. 79-108.
- WIEGAND, C. L., A. J. RICHARDSON & E. T. KANEMASU (1979): Leaf-Area Index Estimates for Wheat from Landsat and their Implications for Evapotranspiration and Crop Modeling. In: Agronomy Journal, Vol 71., H. March-April, S. 336-342.
- WIENECKE, FRIEDRICH (1988): Satellitenbilddauswertung - Methodische Grundlagen und ausgewählte Beispiele. Münchener Geographische Abhandlungen, Reihe A, Bd. A 38.
- WIGGERING, HUBERT (1999): Zum Auftrag des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen und zur Umsetzung einer dauerhaft umweltgerechten Entwicklung. In: Zeitschrift für angewandte Umweltforschung., 12. Jg., H. 1, S. 9-29.
- WILLIAMS, JONATHAN (1995): Geographic Information from Space Processing and Applications of Geocoded Satellite Images. Chichester, New York u.a.
- WISSENSCHAFTSZENTRUM BERLIN & BUNDESDEUTSCHER ARBEITSKREIS FÜR UMWELTBEBUßTES MANAGEMENT (Hrsg.) (1999): Jahrbuch Ökologie 1998 Hamburg, München.
- WITSCHAS, SABINE (2000): Geländeinformation für Europa - Rasterdaten aus dem Internet und wie weiter? In: Kartographische Nachrichten, H. 6, S. 281-285.
- WOLFF, G. (1970a): Die Erkennung biotischer Schäden im Falschfarbluftbild und ihre Bedeutung für die Forstschutzpraxis. In: Beiträge für die Forstwirtschaft: Luftbildanwendung, H. III, S. 34-38.
- WOLFF, G. (1970b): Möglichkeiten der Frühdiagnose von Kronenschäden auf Falschfarbigen Luftbildern. In: Beiträge für die Forstwirtschaft: Luftbildanwendung, H. III, S. 39-41.

- WOLFF, G. (1991): Waldzustanderfassung. Die Eberswalder Luftbildforschung. Ein Beitrag zur Grundlagenforschung der Vegetationsinventur. In: OESTEN, KUNTZ & GROSS (Hrsg.): Fernerkundung in der Forstwirtschaft: Stand und Entwicklungen. Karlsruhe, S. 83-99.
- WOLFF-STRAUB, ROTRAUD, GEORG VERBÜCHELN, LUTZ GEUBLER & HEINRICH KÖNIG (1996): Biomonitoring: ein neu zu gestaltendes Aufgabengebiet der LÖBF. In: LÖBF-Mitteilungen, H. 4, S. 12-18.
- WORLDWATCH INSTITUTE (Hrsg.) (1998): Worldwatch Institute Report: Zur Lage der Welt 1998. Daten für das Überleben unseres Planeten. Frankfurt a. M.
- WUPPERTAL-INSTITUT et al. (Hrsg.) (1997): Zukunftsfähiges Deutschland: ein Beitrag zu einer global nachhaltigen Entwicklung. 4. überarb. u. erw. Auflage, Berlin, Boston, Basel.
- ZHOU, J., D. L. CIVCO & J. A. SILANDER (1998): A wavelet transform method to merge Landsat TM and SPOT panchromatic data. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 19, No. 4, S. 743-757.
- ZIEKOW, JAN (1999): Strategische Umweltverträglichkeitsprüfung - ein neue Anlauf. In: Umwelt und Planungsrecht (UPR), H. 8, S. 287-294.
- ZIEMKE, KRISTIN & IVONNE GÜLS (1999): Monitoring von Biotopen durch Einsatz der Fernerkundung - Untersuchung im Rahmen des Arten- und Biotopschutzprogramms Bayern In: BLASCHKE, THOMAS (Hrsg.): Umweltmonitoring und Umweltmodellierung: GIS und Fernerkundung als Werkzeuge einer nachhaltigen Entwicklung. Heidelberg, S. 91-98.

**Verzeichnis der Internetadressen**

//198.103.176.126/adrohomepage.html

//southport.jpl.nasa.gov./polar/ers1.html

fwserver1.ifag.de

http://a5.leipzig.ifag.de:8080/dstinfo

http://isis.dlr.de

ka.eurimage.com/Products

www.aerowest.de

www.ccrs.nrcan.gc.ca/ccrs/homepg?e

www.digitalglobe.com/company/spacecraft/quickbird.html

www.dlr.de

www.eds.dofn.de

www.erdas.com/products/product.html

www.esrin.esa.it

www.eurimage.com

www.eurimage.it/Products

www.eurimage.it/Products/RESURS\_01.html

www.eurosense.com

www.euromap.de

www.euromap.de/doc\_005htm

www.euromap.de/doc\_106htm

www.geosystems.de

www.geosystems.de/Scan Service

www.goin.nasda.go.jp

www.haltern.de

www.hansaluftbild.de

www.hewlett-packard.de/printer

www.hoai.de

www.lverma.nrw.de

www.marl.de

[www.orbimage.com/satellite](http://www.orbimage.com/satellite)

[www.recklinghausen.de](http://www.recklinghausen.de)

[www.spaceimaging.com](http://www.spaceimaging.com)

[www.spaceimaging.com/aboutus/satellites/IKONOS](http://www.spaceimaging.com/aboutus/satellites/IKONOS)

[www.spotimage.fr](http://www.spotimage.fr)

[www.vexscan.com](http://www.vexscan.com)

[yyy.tksc.nasda.go.jp/Home/This/This-e/jers\\_e.html](http://yyy.tksc.nasda.go.jp/Home/This/This-e/jers_e.html)

[yyy.tksc.nasda.go.jp/Home/This/This-e/mos-e.html](http://yyy.tksc.nasda.go.jp/Home/This/This-e/mos-e.html)

**Bezugsquellen der Luft- und Satellitenbilddaten**

Colorinfrarotluftbildbefliegung vom 25.07.1985: Bildstreifen 1: Bildnrn. 664-672; Bildstreifen 2: Bildnrn. 712-725. Quelle: KOMMUNALVERBAND RUHRGEBIET (KVR), Essen.

Colorluftbildbefliegung vom 05.05.1990: Bildnrn. 3946, 3942, 3938. Quelle: KOMMUNALVERBAND RUHRGEBIET (KVR), Essen.

Colorluftbildbefliegung vom 13./14.10.1990: Bildstreifen 18: Nrn. 6221-6241; Bildstreifen 19: Nrn. 5882-5905. Quelle: LIPPEVERBAND, Dortmund.

Colorluftbildbefliegung vom 26.10.1991: Bildstreifen 001: Nrn. 3103-3109; Bildstreifen 002: Nrn. 3176-3186; Bildstreifen 003: Nrn. 3150-3174; Bildstreifen 004: Nrn. 3115-3143; Bildstreifen 005: Nrn. 3193-3199. Quelle: LIPPEVERBAND, Dortmund.

Landsat-5-TM-Szene 196/24 vom 01.05.1986. Quelle: DSK, Abt. DG, Bottrop.

SPOT-Szene K/J: 46/245 vom 01.05.1986. Quelle: DSK, Abt. DG, Bottrop.

Landsat-5-TM-Szene 196/24 vom 17.05.1986. Quelle: DSK, Abt. DG, Bottrop.

Landsat-5-TM-Szene 196/24 vom 02.07.1991. Quelle: DSK, Abt. DG, Bottrop.

Landsat-5-MSS-Szene 196/24 vom 02.07.1991. Quelle: GEOGRAPHISCHES INSTITUT DER RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM.

Bezugsquellen der Karten

- BÜRO FROELICH & SPORBECK (1995): Ökologisches Gutachten zum Rahmenbetriebsplan Blumen-thal/Haard: Karte 5: Realnutzung nach Biotoptypen. Bochum.
- BÜRO FROELICH & SPORBECK (1998a): UVS zur Steinkohle-Abbauplanung Auguste Victoria: Karte 1: Bestand, Biotoptypen und Planungen. Bochum.
- BÜRO FROELICH & SPORBECK (1998b): UVS zur Steinkohle-Abbauplanung Olfen: Karte 5.12: ökologische Situation an Lippe und Stever. Bochum.
- BURRICHTER, E. (1973): Die potentiell natürliche Vegetation in der Westfälischen Bucht. Karten-teil. Siedlung und Landschaft in Westfalen, Bd. 8. Münster.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT (GLA, Hrsg.) (1975/1990): Geologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:100.000 mit Erläuterungen zu Blatt C4306 Recklinghausen und C4310 Münster. Krefeld.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT (GLA, Hrsg.) (1975/1990): Hydrogeologische Karte von Nordrhein-Westfalen 1:100.000 mit Erläuterungen zu Blatt C4306 Recklinghausen und C4310 Münster. Krefeld.
- GEOLOGISCHES LANDESAMT (GLA, Hrsg.) (1987): Bodenkarten von Nordrhein-Westfalen 1:50.000: Blatt L4308 Recklinghausen. Krefeld.
- KOMMUNALVERBAND RUHRGEBIET, (KVR, Hrsg.) (1992): Synthetische Klimafunktionskarte Ruhrgebiet: Kartenteil. Essen.
- KOMMUNALVERBAND RUHRGEBIET, (KVR, Hrsg.) (1985): Wuchsklimate des Ruhrgebiets und angrenzender Bereiche: Kartenteil. Essen.
- KREIS RECKLINGHAUSEN, KATASTERAMT (Hrsg.) (2000): digitale DGK5. Recklinghausen (Geneh-migung Nr. 2608 v. 03.03.2000).
- LANDESVERMESSUNGSAMT NRW (LVA, Hrsg.) (1987-1997): DGK5-Blätter, Gauß-Krüger-Eck-koordinaten: RW: <sup>25</sup>80-<sup>25</sup>84, HW: <sup>57</sup>30-<sup>57</sup>34. Bonn Bad-Godesberg.
- LANDESVERMESSUNGSAMT NRW (LVA, Hrsg.) (2000): ATKIS-Daten: DLM 25 mit den Gauß-Krüger-Eckkoordinaten: RW: <sup>25</sup>80-<sup>25</sup>89, HW: <sup>57</sup>27-<sup>57</sup>35. Bonn Bad-Godesberg (CD-Rom).
- LANDESVERMESSUNGSAMT NRW (LVA, Hrsg.) (1997): Top50 NRW, Bonn Bad-Godesberg (CD-Rom).
- LANDESVERMESSUNGSAMT NRW (LVA, Hrsg.) (1990): Topographische Karte 1:50.000 L4308 Recklinghausen. Bonn Bad-Godesberg.
- LANDESVERMESSUNGSAMT NRW (LVA, Hrsg.) (1995): Topographische Karte 1:50.000 L4308 Recklinghausen. Bonn Bad-Godesberg.

- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE & HÖHERE FORSTBEHÖRDE (Hrsg.) (1981): Forstbehördlicher und landwirtschaftlicher Fachbeitrag 156: Die forst- und landwirtschaftliche Struktur und ihre Entwicklungstendenzen im Raum Seengebiet Haltern/Kreis Recklinghausen: Kartenteil. Recklinghausen.
- LANDWIRTSCHAFTSKAMMER WESTFALEN-LIPPE & HÖHERE FORSTBEHÖRDE (Hrsg.) (1985): Landwirtschaftlicher und forstbehördlicher Fachbeitrag 184: Die Struktur der Land- und Forstwirtschaft und deren Entwicklungsmöglichkeiten im Bereich des Landschaftsplanes Dorstener Ebene/Kreis Recklinghausen: Kartenteil. Recklinghausen.
- LIPPEVERBAND (Hrsg.) (1995): Lippeauenprogramm: Karte 1: Bestandserfassung und Bewertung. unveröffent. Entwurf, Dortmund.
- TRAUTMANN, WERNER (1972): Vegetation (potentielle natürliche Vegetation): Kartenteil. In: AKADEMIE FÜR RAUMFORSCHUNG UND LANDESPLANUNG NRW (Hrsg.): Deutscher Planungsatlas Düsseldorf, Lieferung 3, Bd. 1.



# Anhang A

**Diagrammverzeichnis**

	Seite
Diagr. A.1: Mittlere Jahrestemperatur, Station Herten (früher Recklinghausen) 1955-1997 .....	298
Diagr. A.2: Mittlere Jahresniederschläge, Station Haltern 1955-1997 .....	299
Diagr. A.3: Station Haltern: Monatsmittel der Temperaturen (°C) und Niederschläge (mm) für Mai .....	300
Diagr. A.4: Station Haltern: Monatsmittel der Temperaturen (°C) und Niederschläge (mm) für Juli .....	301
Diagr. A.5: Blattverfärbungen (Lippramsdorf) in den Jahren 1985, '86, '90 und '91 .....	302
Diagr. A.6: Vegetative Parameter landwirtschaftlicher Nutzung (Lippramsdorf) in den Jahren 1985, '86, '90 und '91 .....	303

**Kartenverzeichnis**

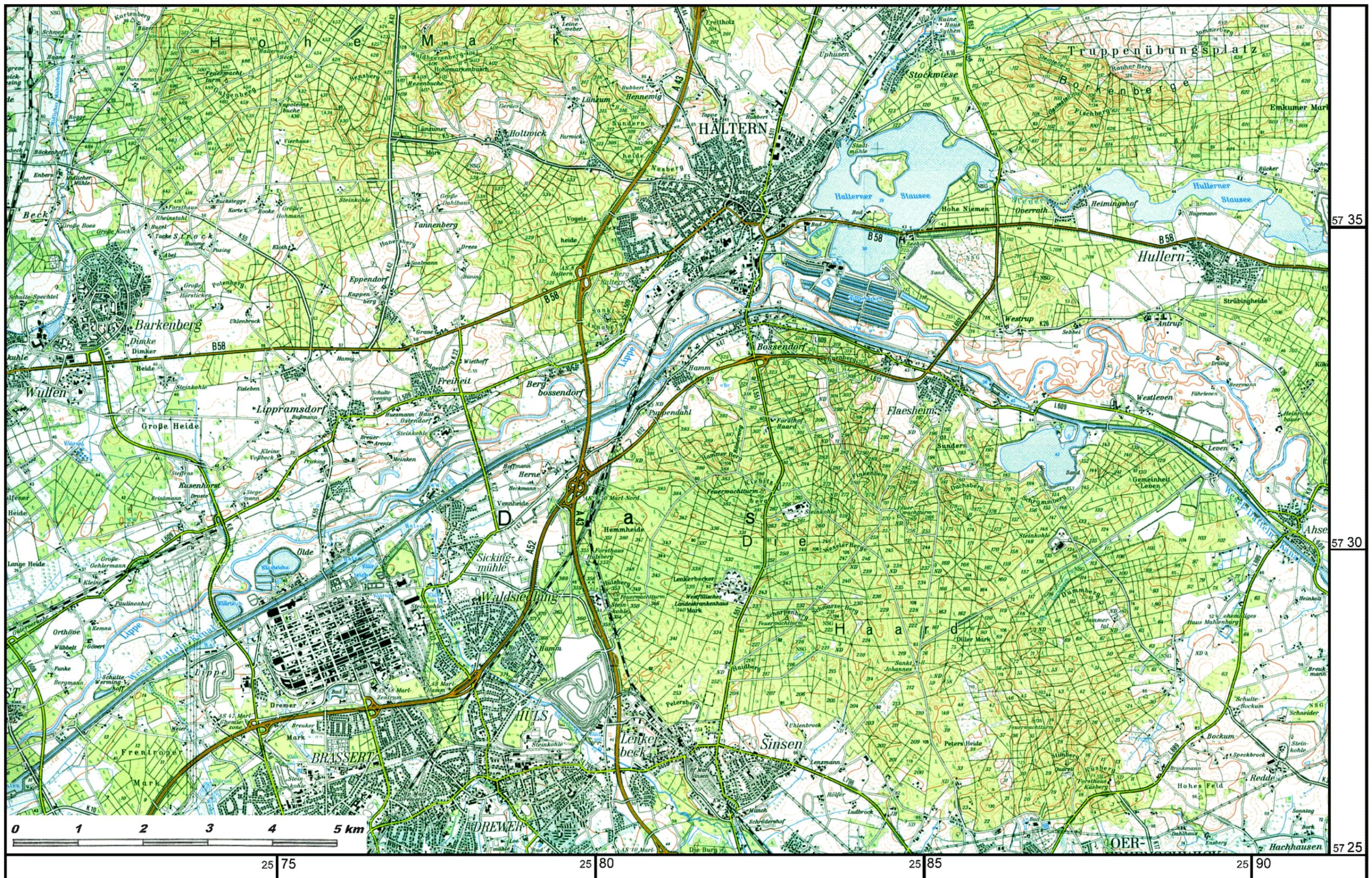
Karte A.1: Der Untersuchungsraum .....	281
--	-----

**Tabellenverzeichnis**

Tab. A.1: Sensorspezifikationen von Landsat MSS und TM .....	282
Tab. A.2: Sensorspezifikationen der NOAA-AVHRR-Serie .....	283
Tab. A.3: Sensorspezifikationen der SPOT-Serie.....	284
Tab. A.4: Sensorspezifikationen der IRS-Serie.....	285
Tab. A.5: Sensorspezifikationen von IKONOS .....	286
Tab. A.6: Sensorspezifikationen von OrbView.....	287
Tab. A.7: Sensorspezifikationen von Early-Bird.....	288
Tab. A.8: Sensorspezifikationen der RESURS-01-Serie .....	289
Tab. A.9: Sensorspezifikationen von MOS.....	290
Tab. A.10: Sensorspezifikationen von JERS .....	291
Tab. A.11: Mittlere Monats- und Jahrestemperatur, Station Herten (früher Recklinghausen) 1955-1997 .....	292
Tab. A.12: Monatsmittel der Niederschläge (mm) Station Haltern, 1955-1997.....	293
Tab. A.13: Station Haltern: Monatsmittel der Temperaturen (°C) und Niederschläge (mm) für Mai (1970-1997) .....	294

	Seite
Tab. A.14: Station Haltern: Monatsmittel der Temperaturen (°C) und Niederschläge (mm) für Juli (1970-1997) .....	294
Tab. A.15: Blattverfärbungen (Lippramsdorf) in den Jahren 1985, '86, '90 und '91 .....	295
Tab. A.16: Vegetative Parameter landwirtschaftlicher Nutzung (Lippramsdorf) in den Jahren 1985, '86, '90 und '91 .....	295
Tab. A.17: Scanner Scanmaster 4500 der Firma Howtek: Technische Daten.....	296
Tab. A.18: Großformatdrucker Design Jet 3000 CP der Firma Hewlett Packard: Technische Daten .....	297

Karte A.1: Der Untersuchungsraum



Quelle: LVA 1997

Tab. A.1: Sensorspezifikationen von Landsat-MSS und -TM

	Landsat 1	Landsat 2	Landsat 3	Landsat 4	Landsat 5	Landsat 7
Start	23.07.1972	22.01.1975	05.03.1978	16.07.1982	01.03.1984	15.04.1999
Missions- ende	06.01.1978	05.02.1982	31.03.1983	Standby ab 7/87		
Flughöhe	907 km	908 km	915 km	705 km	705 km	705 km
Bahn	polar, sonnensynchron					
Inklination	99,2°			98,2°		
Umlaufzeit	103 min			99 min		
Repetitions- rate	18 Tage			16 Tage		16 bzw.8 Tage (bei 60°n.Br.)
				zusammen 4 Tage		
Sensoren	RBV, MSS			MSS, TM		TM, PAN
	MSS		TM	TM 7	PAN 7	
Pixelgröße	79x56 m <sup>2</sup> K8:240x240 m <sup>2</sup>		30x30 m <sup>2</sup> , K6: 120x120 m <sup>2</sup>	30x30 m <sup>2</sup> K6: 60x60 m <sup>2</sup>	15x15 m <sup>2</sup>	
Radiometr. Auflösung	6 Bit: Landsat 1,2,3 7 Bit: Landsat 4,5		8 Bit			
Szenen- größe	185x170 km <sup>2</sup>		185x170 km <sup>2</sup>	185x185 km <sup>2</sup>	185x185 km <sup>2</sup>	
Spektral- kanäle	K4 (1): 0,50-0,60 µm K5 (2): 0,60-0,70 µm K6 (3): 0,70-0,80 µm K7 (4): 0,80-1,10 µm K8: 10,40-12,60 µm (nur bei Landsat3) die Nummerierung in Klammern bezieht sich auf Landsat 4,5		K1: 0,45-0,52 µm K2: 0,52-0,60 µm K3: 0,60-0,69 µm K4: 0,76-0,90 µm K5: 1,55-1,75 µm K6: 10,4-12,5 µm K7: 2,08-2,35 µm	K1: 0,45-0,52 µm K2: 0,52-0,60 µm K3: 0,60-0,69 µm K4: 0,76-0,90 µm K5: 1,55-1,75 µm K6: 10,4-12,5 µm K7: 2,08-2,35 µm	PAN: 0,52- 0,90 µm	
				Komb. von 7K+Pan, 7K, Pan möglich		

Quelle: JÜRGENS 1998, S. 119 ff.; Internet-Recherche: [ka.eurimage.com/Products](http://ka.eurimage.com/Products)

Tab. A.2: Sensorspezifikationen der NOAA-AVHRR-Serie

Frühere Generationen der NOAA-AVHRR-Serie	<b>TIROS-1 bis 10:</b> 1960-1965 <b>ITOS-1 bis NOAA-5:</b> 1970-1976 <b>TIROS-N (AVHRR):</b> 1978 <b>NOAA-6 (AVHRR/1):</b> 1979, Ende: 31.03.87 <b>NOAA-7 (AVHRR/2):</b> 1981, Ende: Juni 86 <b>NOAA-8 (AVHRR/2):</b> 1983, Ende: 29.12.85					
Aktive Generationen der NOAA-AVHRR-Serie						
	NOAA-9	NOAA-10	NOAA-11	NOAA-12	NOAA-14	NOAA-15
Start	12.12.84	17.09.86	24.09.88	14.05.91	30.12.94	13.05.98
Flughöhe	800-850 km					
Bahn	polar, sonnensynchron					
Inklination	98-99°					
Umlaufzeit	102 min					
Repetitionrate	24 Std. für 100% Erdabdeckung pro Satellit, 11 Tage pro Erdausschnitt					
Sensoren	AVHRR/1	AVHRR/2	AVHRR/2	AVHRR/1	AVHRR/2	AVHRR/3
	AVHRR/1		AVHRR/2		AVHRR/3	
Pixelgröße	1,1x1,1 km <sup>2</sup>					
Radiometrische Auflösung	10 Bit					
Szenenbreite	3000 km					
Spektralkanäle	K1: 0,58-0,68 µm K2: 0,725-1,10 µm K3: 3,55-3,93 µm K4: 10,50-11,50 µm		K1: 0,58-0,68 µm K2: 0,725-1,10 µm K3: 3,55-3,93 µm K4: 10,30-11,30 µm K5: 11,50-12,50 µm		K1: 0,58-0,68 µm K2: 0,725-1,10 µm K3: 3,55-3,93 µm K3b: 1,3-1,9 µm K4: 10,30-11,30 µm K5: 11,50-12,50 µm	

Quelle: JÜRGENS 1998, S. 119 ff.; CRACKNELL 1997, S. 14 ff.; Internet-Recherche: [www.eurimage.it/Products](http://www.eurimage.it/Products)

Tab. A.3: Sensorspezifikationen der SPOT-Serie

	<b>SPOT-1</b>	<b>SPOT-2</b>	<b>SPOT-3</b>	<b>SPOT-4</b>	<b>SPOT-5</b>
Start	22.02.1986	22.01.1990	26.09.1993	24.03.1998	2002
Missionsende			14.11.1996		
Flughöhe	832 km			822 km	830 km
Bahn	polar, sonnensynchron				
Inklination	98,7°				
Umlaufzeit	101 min				
Repetitionrate	26 Tage				
Sensoren	PAN, XS			PAN, XS	PAN, XS
	PAN, XS: SPOT 1-3		PAN, XS: SPOT 4		PAN, XS: SPOT 5
Pixelgröße	PAN: 10x10 m <sup>2</sup> XS: 20x20 m <sup>2</sup>		PAN: 10x10 m <sup>2</sup> XS: 20x20 m <sup>2</sup>		PAN: 2,5x2,5 m <sup>2</sup> und 5x5 m <sup>2</sup> XS: 10x10 m <sup>2</sup>
Radiometrische Auflösung	PAN: 6 Bit XS: 8 Bit				
Szenengröße	60x60 km <sup>2</sup> bis 60x80 km <sup>2</sup>				
Spektralkanäle	PAN: 0,51-0,73 µm XS: K1: 0,50-0,59 µm K2: 0,61-0,68 µm K3: 0,79-0,89 µm		PAN: 0,61-0,68 µm XS: K1: 0,50-0,59 µm K2: 0,61-0,68 µm K3: 0,79-0,89 µm K4: 1,58-1,75 µm		PAN: 0,51-0,73 µm XS: K1: 0,50-0,59 µm K2: 0,61-0,68 µm K3: 0,79-0,89 µm K4: 1,58-1,75 µm

Quelle: JÜRGENS 1998, S. 119 ff.; Internet-Recherche: [www.spotimage.fr](http://www.spotimage.fr)

Tab. A.4: Sensorspezifikationen der IRS-Serie

	<b>IRS-1A</b>	<b>IRS-1B</b>	<b>IRS-1C</b>	<b>IRS-P2</b>	<b>IRS-P3</b>	<b>IRS-1D</b>
Start	17.03.1988	29.08.1991	28.12.1995	16.10.1994	15.02.1996	29.09.1997
Flughöhe	900 km		817 km			
Bahn	polar, sonnensynchron					
Inklination	99,5°		98,7°			
Umlaufzeit	103 min		101 min			
Repetitionrate	22 Tage		24 Tage			
Sensoren	1 x LISS-I 2 x LISS-II		WiFS, PAN, LISS-III	2 x LISS-II	WiFS, MOS-A, B, C	WiFS, PAN, LISS-III
	LISS-I	LISS-II	LISS-III	PAN		
Pixelgröße	72x72 m <sup>2</sup>	36x36 m <sup>2</sup>	23x23 m <sup>2</sup>	5,8 x5,8 m <sup>2</sup>		
Szenengröße	72,2x84 km <sup>2</sup>	72,2x84 km <sup>2</sup>	142x142 km <sup>2</sup> (K4: 148x148 km <sup>2</sup> )	70x70 km <sup>2</sup>		
Radio-metr. Auflösung	7 Bit				6 Bit	
Spektralkanäle	K1: 0,45 -0,52 µm K2: 0,52-0,59 µm K3: 0,62-0,68 µm K4: 0,77-0,86 µm		K1: 0,52-0,59 µm K2: 0,62-0,68 µm K3: 0,77-0,86 µm K4: 1,55-1,70 µm		0,50-0,75 µm	
	WiFS	MOS-A	MOS-B	MOS-C		
Pixelgröße	188x188 m <sup>2</sup>	1,6x1,4 km <sup>2</sup>	520x520 m <sup>2</sup>	520x640 m <sup>2</sup>		
Szenengröße	774x774 km <sup>2</sup> (IRS-1D: 728x812 km <sup>2</sup> )	195x196 km <sup>2</sup>	200x200 km <sup>2</sup>	192x192 km <sup>2</sup>		
Radio-metr. Auflösung	7 Bit	12 Bit				
Spektralkanäle	K1: 0,62 -0,68µm K2: 0,72-0,86µm K3: 1,55-1,70µm (K3 nur bei IRS-P3)	0,756-0,758 µm 0,760-0,762 µm 0,763-0,764 µm 0,766-0,767 µm	0,403-0,413 µm 0,438-0,448 µm 0,480-0,490 µm 0,515-0,525 µm 0,565-0,575 µm 1,005-1,015 µm 0,810-0,820 µm 0,610-0,620 µm 0,645-0,655 µm 0,680-0,690 µm 0,745-0,755 µm 0,865-0,875 µm 0,940-0,950 µm		1,55-1,66 µm	

Quelle: JÜRGENS 1998, S. 119 ff.; Internet-Recherche: [www.euromap.de/doc\\_106.htm](http://www.euromap.de/doc_106.htm) und [www.euromap.de/doc\\_005.htm](http://www.euromap.de/doc_005.htm)

Tab. A.5: Sensorspezifikationen von IKONOS

<b>IKONOS</b>		
Start	24.09.1999	
Flughöhe	681 km	
Bahn	polar, sonnensynchron	
Inklination	98,1°	
Umlaufzeit	98 min	
Repetitionrate	1-m-Aufl.: 2,9 Tage , 1,5-m-Aufl.: 1,5 Tage bei 40°n./s. Br.	
Sensor	Kodak Digital-Kamera-System (pan und multispektral)	
	PAN	Multispektral
Pixelgröße	1x1 m <sup>2</sup>	4x4 m <sup>2</sup>
Radiometrische Auflösung	11 Bit	11 Bit
Szenengröße	13x13 km <sup>2</sup>	
Spektralkanäle	0,45-0,90 µm	K1: 0,45-0,52 µm K2: 0,52-0,60 µm K3: 0,63-0,69 µm K4: 0,76-0,90 µm

Quelle: Internet-Recherche: [www.spaceimaging.com/aboutus/satellites/IKONOS](http://www.spaceimaging.com/aboutus/satellites/IKONOS)

Tab. A.6: Sensorspezifikationen von OrbView

	<b>OrbView-1</b>	<b>OrbView-2</b>	<b>OrbView-3</b>	<b>OrbView-4</b>	
Start	April 1995	August 1997	k. A.	k. A.	
Missionsende	2000	ca. 6/2004	nach 5 J.	nach 5 J.	
Flughöhe	740 km	705 km	470 km	470 km	
Bahn	polar				
Inklination	70°				
Repetitionrate	Unter 2 Tage	1 Tag	unter 3 Tage		
Sensoren	monochromat.	multispek.	pan., multisp.	pan., multisp., hyperspektral	
	monochromat.	multispektral (OV-2)	panchromatisch	multispektral (OV-3/4)	hyperspektral
Pixelgröße	10x10 km <sup>2</sup>	1x1 km <sup>2</sup>	1x1 m <sup>2</sup>	4x4 m <sup>2</sup>	8x8 m <sup>2</sup>
Szenengröße	1,3 km breit kontinuierlich	2,8 km breit kontinuierlich	8x8 km <sup>2</sup>	8x8 km <sup>2</sup>	5x5 km <sup>2</sup>
Spektralkanäle	777µm als zentrale Wellenlänge des einen Kanals	0,402-0,422µm 0,433-0,453µm 0,480-0,500µm 0,500-0,520µm 0,545-0,565µm 0,660-0,680µm 0,745-0,785µm 0,845-0,885µm	0,450-0,900µm	0,450-0,520µm 0,520-0,600µm 0,625-0,695µm 0,760-0,900µm	200 Kanäle von 0,450-2,500 µm

Quelle: Internet-Recherche: [www.orbimage.com/satellite](http://www.orbimage.com/satellite)

Tab. A.7: Sensorspezifikationen von Early-Bird

Frühere Generationen: <b>EarthWatch-Serie</b>	<b>Early-Bird 1</b> 1997 (nach 4 Tagen ausgefallen) <b>Early-Bird 2</b> nicht gestartet aufgrund damaliger Marktentwicklungen	
Aktive Generation der EarthWatch-Serie		
	<b>QuickBird 1</b>	
Start	1999	
Flughöhe	600 km	
Bahn	nicht sonnensynchron	
Inklination	66° medium Inklination, Äquatorüberquerung variabel	
Repetitionrate	zwischen 1 u. 5 Tage je nach Breitengrad	
Sensoren	PAN	MSS
	PAN	MSS
Pixelgröße	1x1 m <sup>2</sup>	4x4 m <sup>2</sup>
Radiometrische Auflösung	11 Bit	
Szenengrößen	22x22 km <sup>2</sup> , 40x40 km <sup>2</sup> , 22x200 km <sup>2</sup> , 20x20 km <sup>2</sup>	
Spektralkanäle	K1: 0,45-0,90 µm	K1: 0,45-0,52 µm K2: 0,52-0,60 µm K3: 0,63-0,69 µm K4: 0,76-0,89 µm

Quelle: Internet-Recherche: [www.digitalglobe.com/company/spacecraft/quickbird.html](http://www.digitalglobe.com/company/spacecraft/quickbird.html)

Tab. A.8: Sensorspezifikationen der RESURS-01-Serie

Frühere Generationen der <b>RESURS-01-Serie</b>	1985-1988 1988-1995	
Aktive Generation der RESURS-01-Serie		
Start	1994	
Flughöhe	678 km	
Bahn	polar, sonnensynchron	
Inklination	98°	
Umlaufzeit	98 min	
Repetitionrate	21 Tage, 4 T. am Äquator bis 1 T. a.d. Arktis/Antarktis	
Sensoren	MSU-SK	MSU-E (kein kommerzieller Vertrieb)
Pixelgröße	160x160 m <sup>2</sup> , TIR: 600x600 m <sup>2</sup>	45x33 m <sup>2</sup>
Radiometrische Auflösung	8 Bit	
Szenenbreite	600 km	45 km
Spektralkanäle	K1: 0,5-0,6 µm K2: 0,6-0,7 µm K3: 0,7-0,8 µm K4: 0,8-1,1 µm K5: 10,4-12,6 µm	K1: 0,5-0,6µm K2: 0,6-0,7 µm K3: 08,-0,9 µm

Quelle: JÜRGENS 1998, S. 119 ff.; Internet-Recherche: [www.eurimage.it/Products/RESURS\\_01.html](http://www.eurimage.it/Products/RESURS_01.html)

Tab. A.9: Sensorspezifikationen von MOS

	<b>MOS-1</b>	<b>MOS-1b</b>
Start	19.02.1987	07.02.1990
Missionsende	29.11.1995	17.04.1996
Flughöhe	909 km	
Bahn	polar, sonnensynchron	
Inklination	99,1°	
Umlaufzeit	103 min	
Repetitionrate	17 Tage	
Sensor	MESSR	
	<b>MSU-SK</b>	<b>MSU-E</b>
Pixelgröße	50x50 m <sup>2</sup>	
Szenenbreite	100 km	
Spektralkanäle	K1: 0,51-0,59µm K2: 0,61-0,69µm K3: 0,73-0,80µm K4: 0,80-1,10µm	

Quelle: JÜRGENS 1998, S. 119 ff.; Internet-Recherche: [yyy.tksc.nasda.go.jp/Home/This/This-e/mos\\_e.html](http://yyy.tksc.nasda.go.jp/Home/This/This-e/mos_e.html)

Tab. A.10: Sensorspezifikationen von JERS

	<b>JERS-1</b>
Start	1992
Missionsende	12.10.1998
Flughöhe	570 km
Bahn	polar, sonnensynchron
Inklination	98°
Umlaufzeit	96 min
Repetitionrate	44 Tage
Sensor	OPS
	OPS
Pixelgröße	18x24 m <sup>2</sup>
Szenenbreite	75 km
Spektralkanäle	K1: 0,52-0,60 µm K2: 0,63-0,69µm K3: 0,76-0,86 µm (Stereo, Nadir-viewing) K4: 0,76-0,86 µm (Stereo, forwardviewing) K5: 1,60-1,71 µm K6: 2,01-2,12 µm K7: 2,13-2,25 µm K 8: 2,27-2,40 µm

Quelle: JÜRGENS 1998, S. 119 ff.; Internet-Recherche: [yyy.tksc.nasda.go.jp/Home/This/This-e/jers\\_e.html](http://yyy.tksc.nasda.go.jp/Home/This/This-e/jers_e.html)



Tab. A.12: Monatsmittel der Niederschläge (mm) Station Haltern, 1955-1997

	Jan.	Feb.	März	April	Mai	Juni	Juli	Aug.	Sept.	Okt.	Nov.	Dez.	Mittel werte
1955	56	51	41	33	77	50	73	58	97	54	21	90	58,4
1956	82	12	51	38	26	95	135	118	92	97	46	41	69,4
1957	55	127	76	5	65	50	105	103	174	38	40	57	74,6
1958	92	102	26	54	114	62	89	99	53	78	28	82	73,3
1959	67	3	34	35	37	33	65	40	7	53	30	52	38,0
1960	69	30	14	41	78	34	69	189	103	132	108	92	79,9
1961	95	76	46	111	58	71	93	76	65	79	63	133	80,5
1962	85	77	47	63	58	13	68	77	82	19	30	107	60,5
1963	18	15	57	43	52	106	27	63	67	51	96	16	50,9
1964	14	37	46	46	38	35	49	68	75	67	76	65	51,3
1965	104	26	48	88	102	77	162	69	66	21	91	189	86,9
1966	59	93	94	75	62	89	99	67	35	75	101	182	85,9
1967	44	63	77	48	89	53	50	72	52	79	74	100	66,8
1968	88	27	50	24	76	105	100	165	130	97	42	20	77,0
1969	37	44	38	94	85	50	46	96	10	12	75	21	50,7
1970	47	122	62	103	60	32	124	23	81	91	72	43	71,7
1971	55	33	30	45	57	127	31	52	39	24	72	26	49,3
1972	16	17	45	67	75	76	87	62	82	12	54	26	51,6
1973	29	50	22	78	54	21	80	36	44	78	65	76	52,8
1974	77	38	62	15	69	127	82	47	95	107	92	132	78,6
1975	68	14	67	55	38	66	45	44	60	18	62	33	47,5
1976	113	24	23	10	47	18	47	29	45	33	74	53	43,0
1977	75	71	36	79	43	71	63	70	15	23	128	53	60,6
1978	47	31	108	26	54	124	73	51	59	14	20	127	61,2
1979	38	51	117	49	86	80	36	113	31	29	91	119	70,0
1980	59	72	53	53	17	106	182	58	75	46	75	60	71,3
1981	107	43	127	13	62	122	66	48	62	111	112	75	79,0
1982	62	16	61	31	72	125	19	59	34	79	77	76	59,3
1983	106	51	81	60	106	77	20	11	81	37	66	59	62,9
1984	107	76	22	25	157	41	73	44	130	113	58	45	74,3
1985	54	7	53	49	70	115	70	85	56	15	52	105	60,9
1986	114	2	96	88	64	134	38	55	44	101	43	112	74,3
1987	48	28	102	29	75	90	62	70	98	62	124	84	72,7
1988	94	70	114	8	16	47	124	46	151	58	55	90	72,8
1989	36	70	83	71	11	97	56	85	63	69	21	112	64,5
1990	66	135	28	42	29	90	44	68	85	35	117	96	69,6
1991	65	21	25	27	26	86	43	31	54	39	127	81	52,1
1992	34	38	106	75	34	97	55	124	50	60	116	57	70,5
1993	112	32	8	70	50	27	154	34	202	95	49	194	85,6
1994	122	22	142	68	47	56	32	45	90	112	83	121	78,3
1995	148	113	85	33	40	56	68	15	88	20	28	50	62,0
1996	4	60	15	3	81	27	67	183	57	83	89	50	59,9
1997	3	128	40	45	86	101	71	63	42	56	29	97	63,4
Mittel werte	66,8	51,6	59,5	49,9	61,5	73,5	73,1	70,0	72,6	59,8	69,1	81,4	65,7
												min	38,0
												max	86,9

Quelle: DWD Essen 1955-1997

Tab. A.13: Station Haltern: Monatsmittel der Temperaturen (°C) und Niederschläge (mm) für Mai (1970-1997)

	°C	mm
1970	13,3	60
1971	15,0	57
1972	12,2	75
1973	12,7	54
1974	k.	69
1975	A.	38
1976	13,9	47
1977	12,2	43
1978	12,9	54
1979	12,8	86
1980	12,3	17
1981	13,8	62
1982	13,3	72
1983	11,6	106
1984	11,1	157
1985	14,4	70
1986	14,4	64
1987	10,8	75
1988	15,4	16
1989	15,2	11
1990	15,1	29
1991	11,2	26
1992	16,3	34
1993	14,9	50
1994	13,2	47
1995	13,5	40
1996	11,9	81
1997	13,6	86
<b>Mittelwerte</b>	<b>13,0</b>	<b>61,5</b>

Quelle: DWD Essen 1970-1997

Tab. A.14: Station Haltern: Monatsmittel der Temperaturen (°C) und Niederschläge (mm) für Juli (1970-1997)

	°C	mm
1970	16,3	124
1971	18,3	31
1972	18,0	87
1973	18,0	80
1974	k.	82
1975	A.	45
1976	20,1	47
1977	17,1	63
1978	15,9	73
1979	16,3	36
1980	15,8	182
1981	16,7	66
1982	19,7	19
1983	20,9	20
1984	16,5	73
1985	17,7	70
1986	17,8	38
1987	17,5	62
1988	16,5	124
1989	18,6	56
1990	17,3	44
1991	19,9	43
1992	19,3	55
1993	17,1	154
1994	22,3	32
1995	21,1	68
1996	17,2	67
1997	17,9	71
<b>Mittelwerte</b>	<b>17,7</b>	<b>73,1</b>

Quelle: DWD Essen 1970-1997

Tab. A.15: Blattverfärbungen (Lippramsdorf) in den Jahren 1985, '86, '90 und '91

	<b>1985</b>	<b>1986</b>	<b>1990</b>	<b>1991</b>
Roßkastanie	22. Sept.	23. Okt.	22. Sept.	6. Okt.
Rotbuche	25. Sept.	30. Sept.	29. Sept.	13. Okt.
Stieleiche	23. Okt.	18. Okt.	16. Okt.	15. Okt.
Hängebirke	25. Sept.	26. Sept.	25. Sept.	1. Okt.

Quelle: DWD Offenbach 1985, 1986, 1990, 1991

Tab. A.16: Vegetative Parameter landwirtschaftlicher Nutzung (Lippramsdorf) in den Jahren 1985, '86, '90 und '91

	<b>1985</b>	<b>1986</b>	<b>1990</b>	<b>1991</b>
Wintergerste Gelbreife	07. Jul.	30. Jun.	10. Jun.	04. Jul.
Winterroggen Gelbreife	17. Jul.	13. Jul.	04. Jul.	10. Jul.
Winterweizen Gelbreife	04. Aug.	22. Jul.	14. Jul.	20. Jul.
Wintergerste Ernte	19. Jul.	16. Jul.	11. Jul.	17. Jul.
Winterroggen Ernte	18. Aug.	07. Aug.	30. Jul.	05. Aug.
Winterweizen Ernte	21. Aug.	13. Aug.	04. Aug.	14. Aug.

Quelle: DWD Offenbach 1985, 1986, 1990, 1991

Tab. A. 17: Scanner Scanmaster 4500 der Firma Howtek: Technische Daten

Scanfläche	27,9cm x 29,9cm
Auflösung	4.000 dpi
Vorlagentyp	Aufsicht- oder Durchsicht, Positiv- oder Negativvorlagen
Vorlagenträger	Auswechselbare Trommel
Vergößerung	10 bis 2400 %
Umfeldblende	12stufige Blende, manuelle oder automatische Einstellung
A/D-Umwandlung	12 bit je Farbe, 4096 Graustufen
Optische Dichte	0-3,8 OD
Trommelgeschwindigkeit	300-1200 Umdrehungen/min
Lichtquelle	Tungsten Halogenlampe
Scantechnologie	3 Fotomultiplier
Schnittstelle	SCSI-2
Farbprozessor	CosMYK-Board (optional)
Scansoftware	PIM, TWAIN, AURORA, SPECTRE PRIN, PRO, COLORBYTE
Fokussierung	Automatisch oder manuell
Rechnerplattformen	Macintosh, Windows, Unix
Abmessungen	Länge: 96,5cm / Höhe: 32,5cm / Breite: 52,4cm
Gewicht	63kg
Anschaffungspreis 1998	inkl. Software und Peripherie: ca. 55.000,-DM

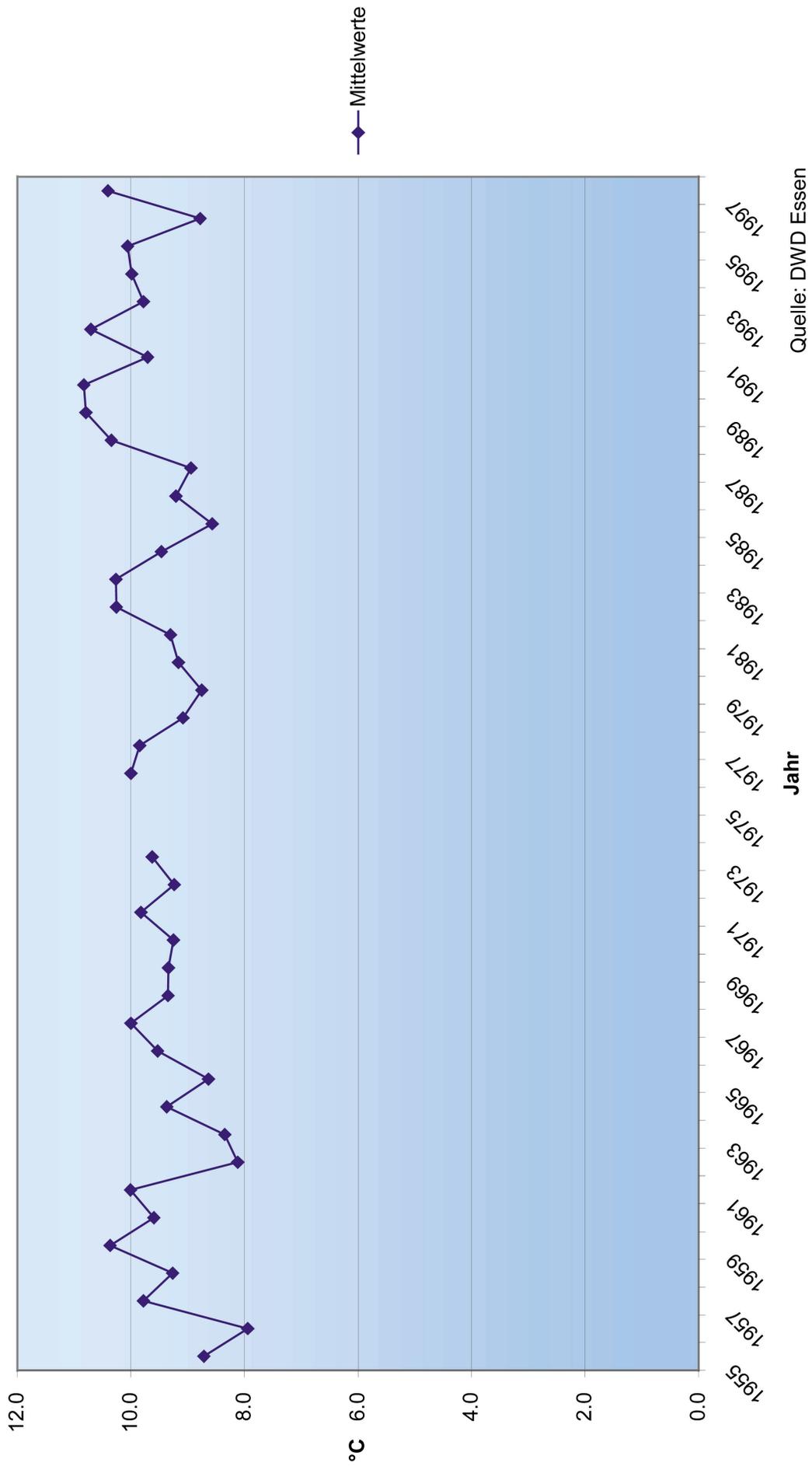
Quelle: Prospekt der Firma HOWTEK 1998

Tab. A.18: Großformatdrucker DesignJet 3000 CP der Firma Hewlett Packard:  
Technische Daten

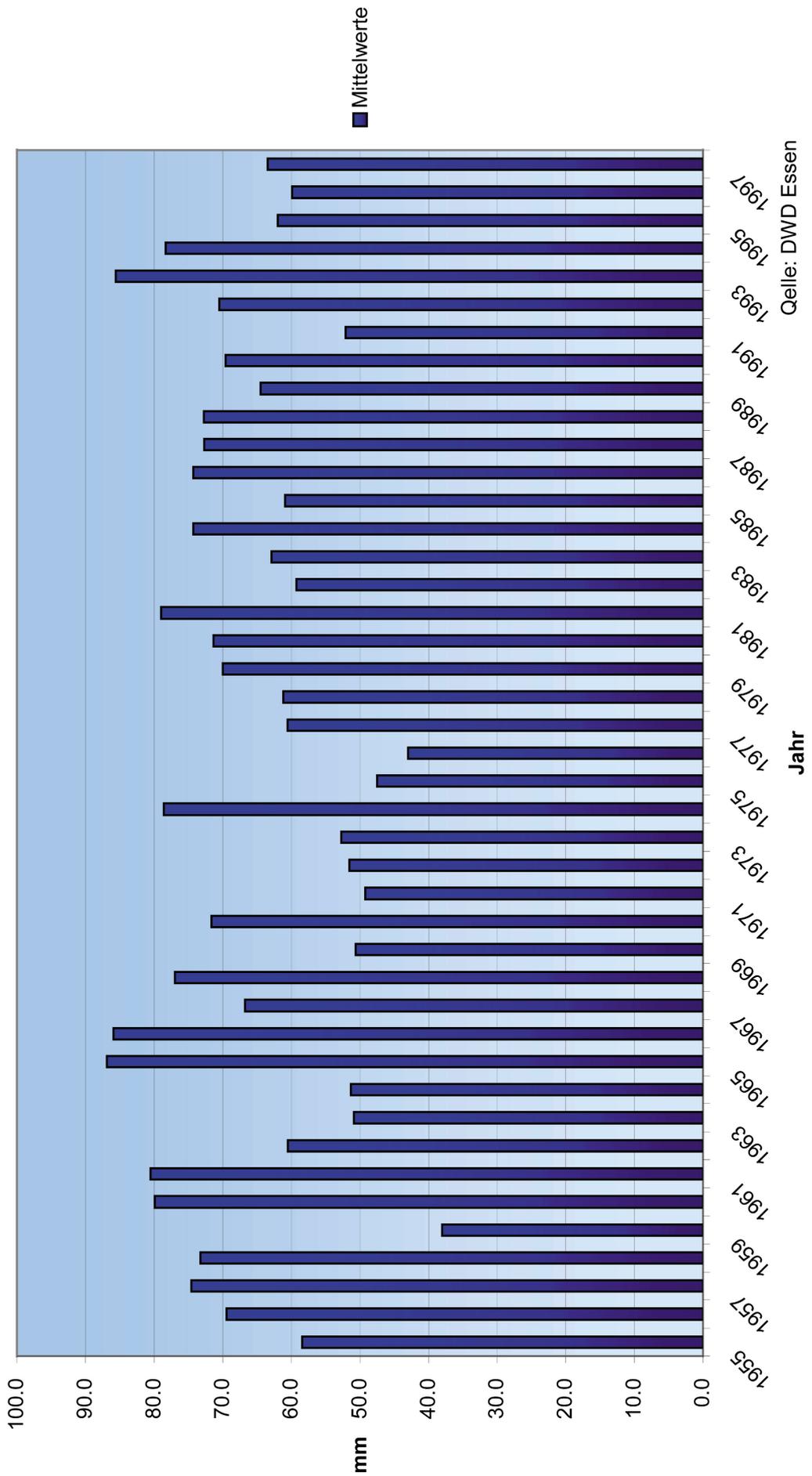
Drucktechnologie	Thermischer Tintenstrahl Druck
Auflösung	300dpi: Schnellmodus, 600dpi: Präsentationsmodus
Druckzeit	8,6 <sup>2</sup> bis 1,7 <sup>2</sup> pro Stunde je nach Modus und RIP
Speicher	12 MB RAM Standard, max. 68 MB
Sprachen	HP-RTL, HP-GL/2, P JL, PML
Netzwerkkarte	Optional
Treiber	AutoCad: R12, R13, R14 abhängig v. DOS bzw. Windows; Windows; 3x, 95, NT4.0
Schnittstellen	HP BI-Tronics, ECP, optional: HP JetDirekt PrintServer
Unterstützte Medien	Versch. Qualitäten von Papier etc.: HP Gestrichenes Papier, HP Fotopapier, 3M (inkl. Folien)
Medienbreite	Min. 210mm, Max. 1370mm, Rollenmaße: 609,6 mm, 914,4 mm, 1070 mm, 1370 mm
Tintensysteme	HP DesignJet CPTintensystem f. fotorealistische Ausdrücke u. UV-Tintensystem f. dauerhafte lichtbeständige Ausdrücke
Sonstiges	USA EPA Star zertifiziert
Abmessungen	Höhe: 1220mm, Tiefe: 672mm, Länge: 2008mm
Gewicht	197 kg
Betriebsumgebungen	Optimale Temperaturbereiche, rel. Luftfeuchtigkeit etc. vorgegeben

Quelle: Internet-Recherche: [www.hewlett-packard.de/printer](http://www.hewlett-packard.de/printer)

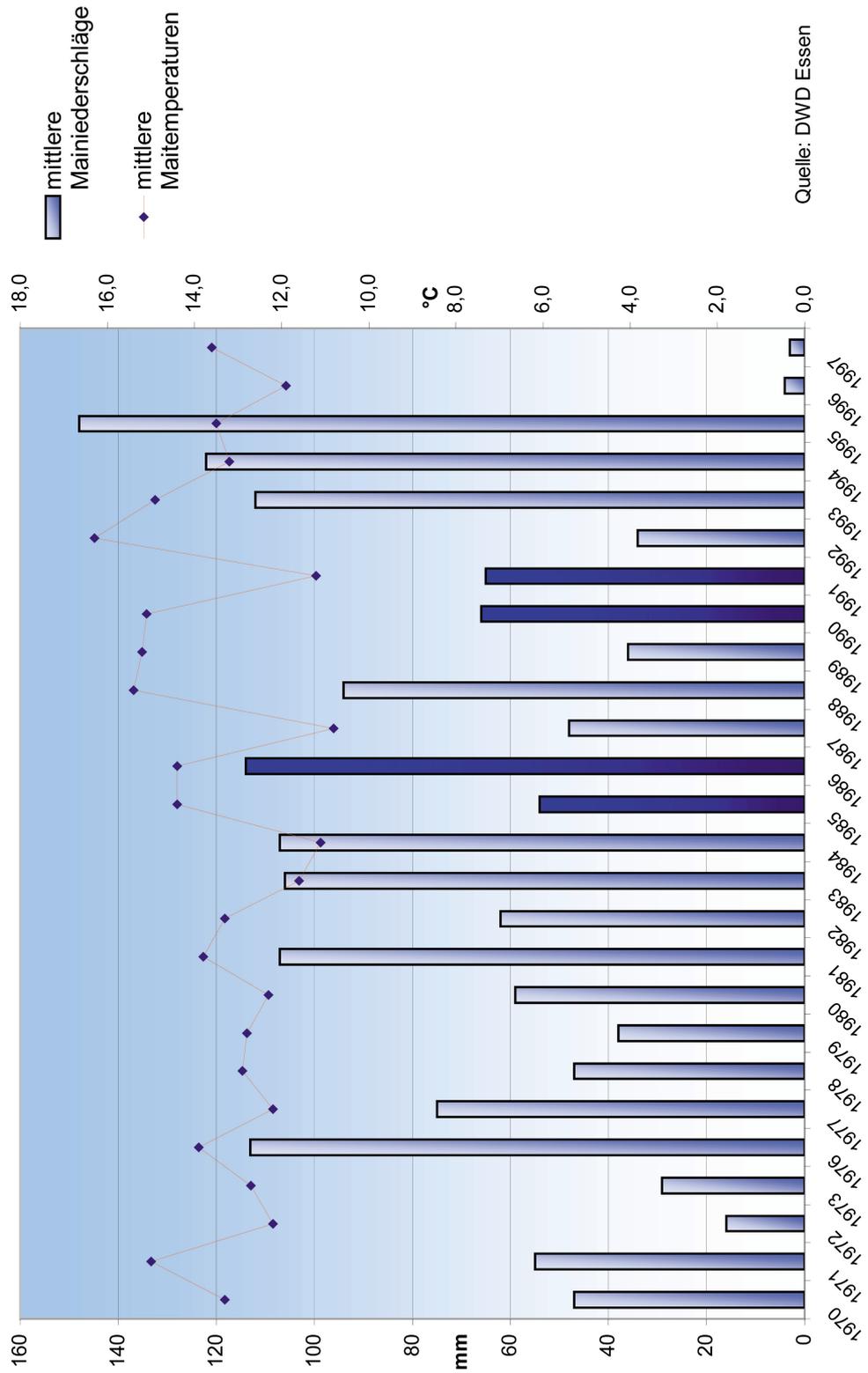
Diagr. A.1: Mittlere Jahrestemperatur, Station Herten (früher Recklinghausen) 1955 - 1997

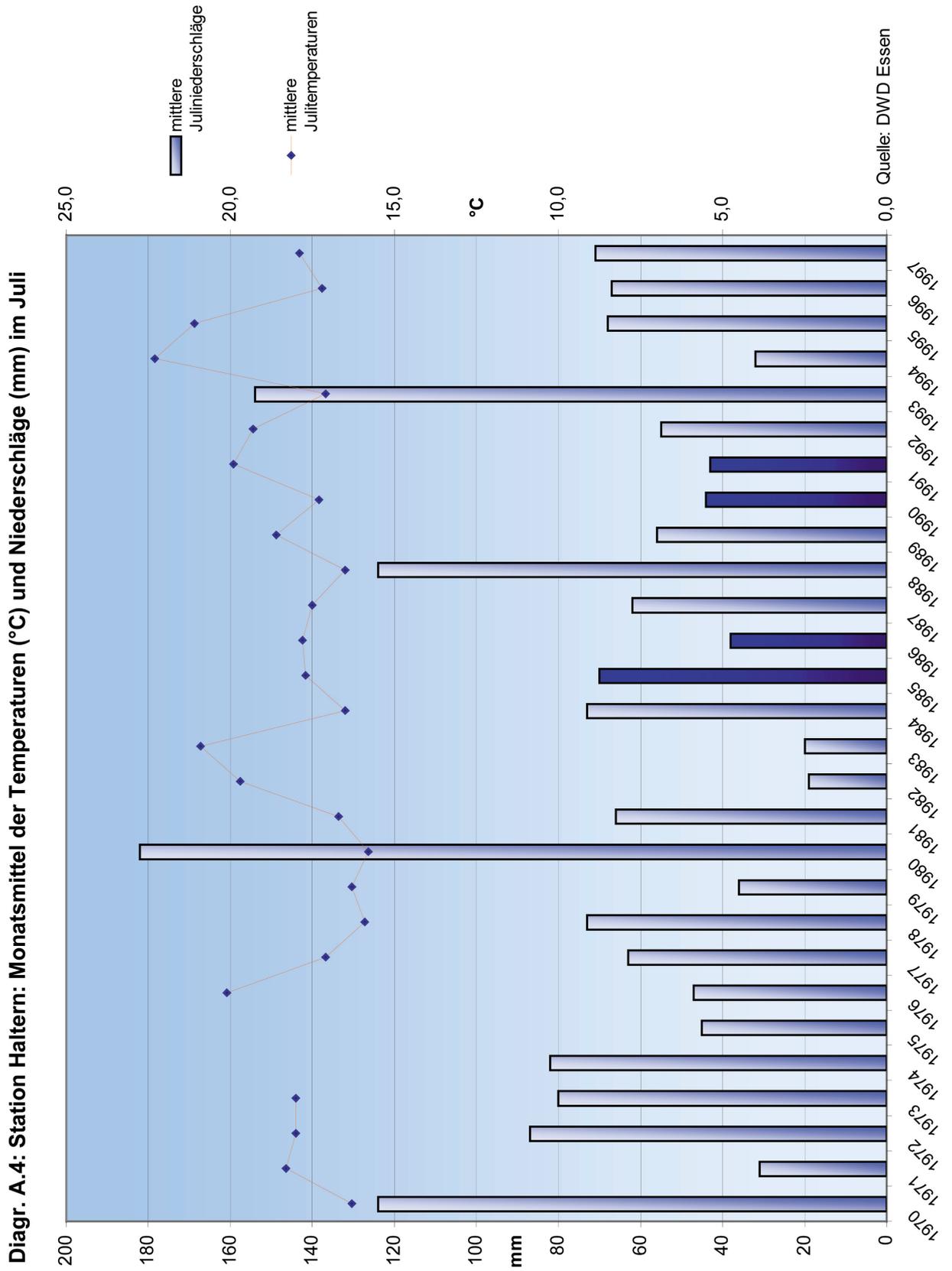


Diagr. A.2: Mittlere Jahresniederschläge, Station Haltern 1955 - 1997

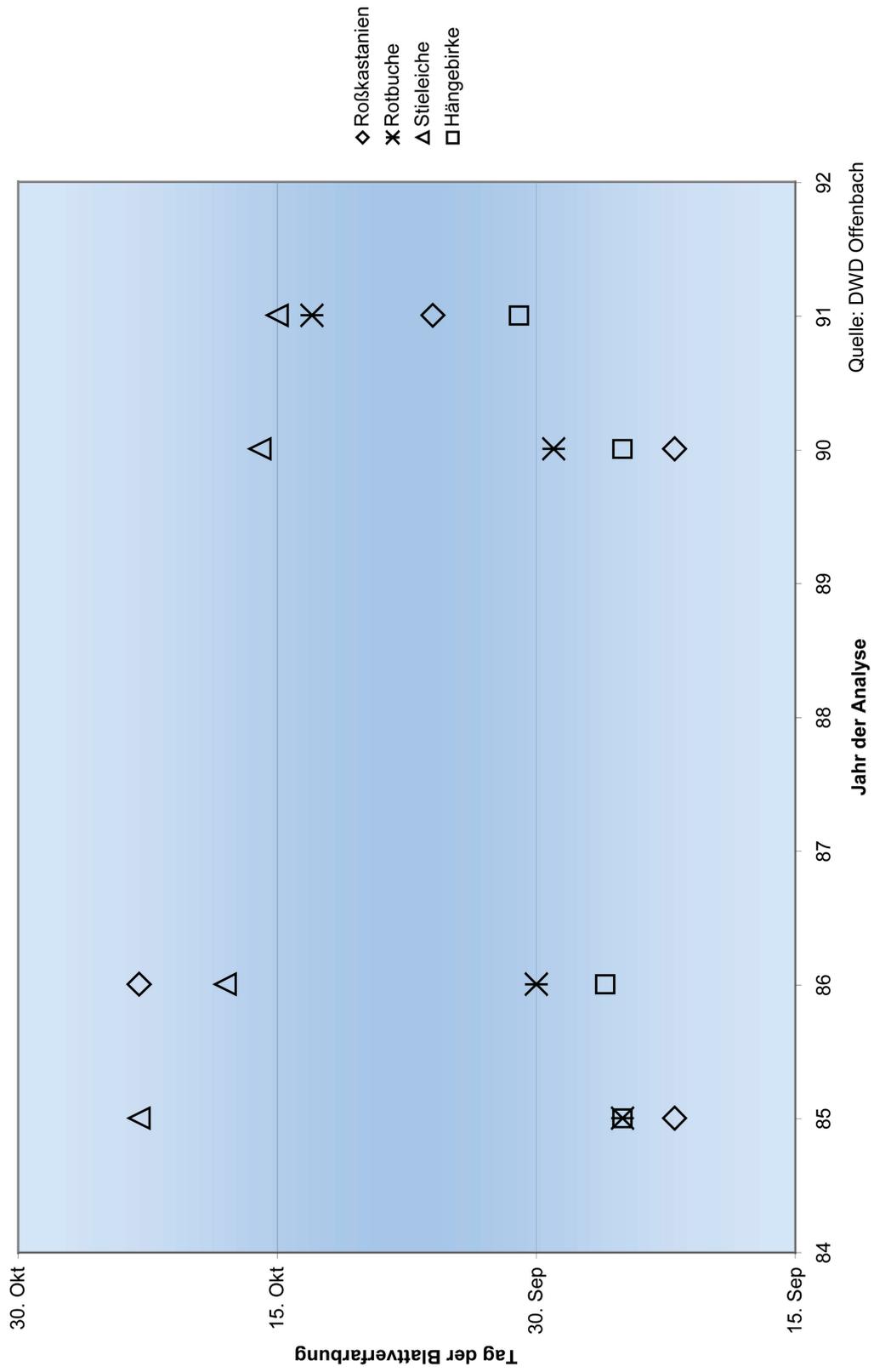


Diagr. A.3: Station Haltern: Monatsmittel der Temperaturen (°C) und Niederschläge (mm) für Mai

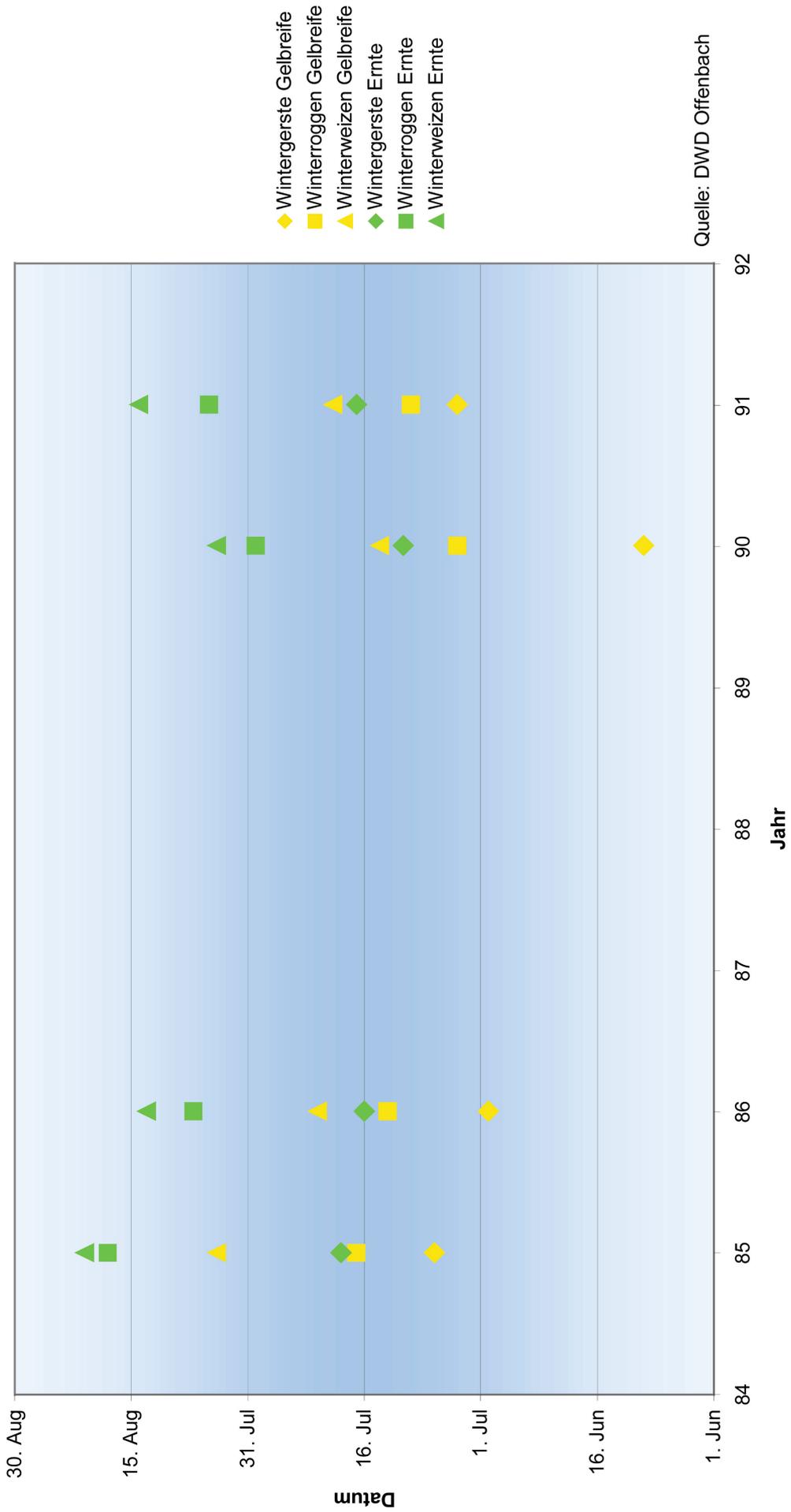




Diagr. A.5: Blattverfärbungen (Lippramsdorf) in den Jahren 1985, '86, '90 und '91



**Diagr. A.6: Vegetative Parameter landwirtschaftlicher Nutzung (Lippramsdorf)  
in den Jahren 1985, '86, '90 und '91**



Quelle: DWD Offenbach

# Anhang B

**Abbildungsverzeichnis**

	Seite
Abb. B.1: Modell des Resamplingverfahrens „Nächster Nachbar“ .....	307
Abb. B.2: Modell des Resamplingverfahrens „Bilineare Interpolation“ .....	307

**Tabellenverzeichnis**

Tab. B.1: DWD-Daten zur Atmosphärenkorrektur mit ATCOR2 (ERDAS Imagine 8.3.1)	306
Tab. B.2: Höhenprofil der US Standard Atmosphäre von 1976 .....	306
Tab. B.3: Vergleichende Gegenüberstellung der Statistiken in DN-Werten und in Prozentwerten für den Landsat-TM-Ausschnitt vom 01.05.1986 .....	308
Tab. B.4: Vergleichende Gegenüberstellung der Statistiken in DN-Werten und in Prozentwerten für den Landsat-TM-Ausschnitt vom 17.05.1986 .....	309
Tab. B.5: Vergleichende Gegenüberstellung der Statistiken in DN-Werten und in Prozentwerten für den Landsat-TM-Ausschnitt vom 02.07.1991 .....	310
Tab. B.6: Vergleichende Gegenüberstellung der Statistiken in DN-Werten und in Prozentwerten für den Landsat-MSS-Ausschnitt vom 02.07.1991 .....	311
Tab. B.7: Kanalweiser Vergleich der radiometrischen Eigenschaften der drei Landsat-TM-Szenen .....	312

Tab. B.1: DWD-Daten zur Atmosphärenkorrektur mit ATCOR2 (ERDAS Imagine 8.3.1)

## Wetterstation Essen

Lagekoordinaten: 51°24' n.Br. / 06°58' ö.L.  
 Höhe: 154 müNN  
 Uhrzeit: 12.00 UTC

## Parameter:

Hpa: Luftdruck in hPa  
 H: Höhe in Km  
 T: Lufttemperatur in °C  
 a: absolute Feuchte in g/m<sup>3</sup>  
 RF: relative Feuchte in %

## Aerologische Daten und Bodensichtweite 01.05.1986

Bodensichtweite 9.00 UTC: 12 Km

hPa	H	T	a	RF
500	5,74	-19	0,613	53,0
700	3,14	-2	1,075	25,5
850	1,57	8	1,456	17,6
1000	0,21	15	6,552	51,1

Quelle: DWD1986, Blatt 01.05.86

## Aerologische Daten und Bodensichtweite 17.05.1986

Bodensichtweite 9.00 UTC: 20 Km

hPa	H	T	a	RF
500	5,74	-16	0,229	15,6
700	3,12	2	1,904	34,3
850	1,55	6	4,729	65,1
1000	0,19	18	5,630	36,6

Quelle: DWD1986, Blatt 17.05.86

## Aerologische Daten und Bodensichtweite 02.07.1991

Bodensichtweite 9.00 UTC: 15 Km

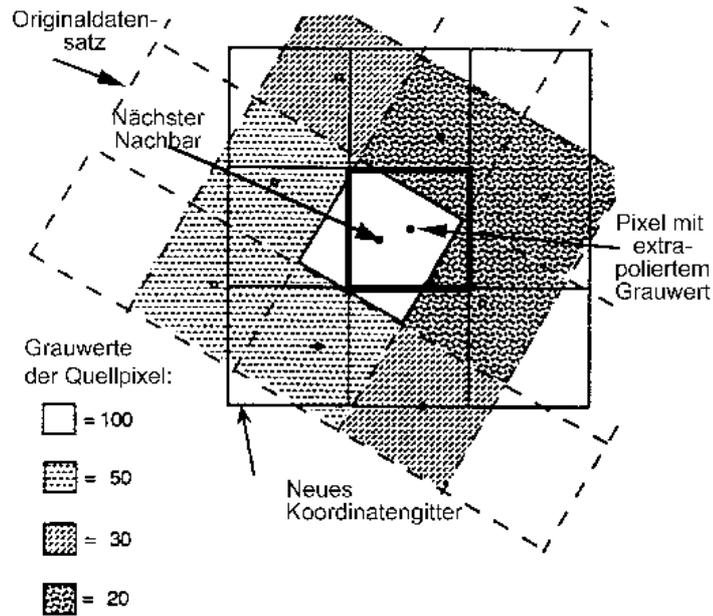
hPa	H	T	a	RF
500	5,78	-14	0,278	16,1
700	3,15	2	2,619	47,1
850	1,55	13	6,150	54,2
1000	0,15	26	14,054	57,6

Quelle: DWD1991, Blatt 02.07.91

Tab. B.2: Höhenprofil der US Standard Atmosphäre von 1976:

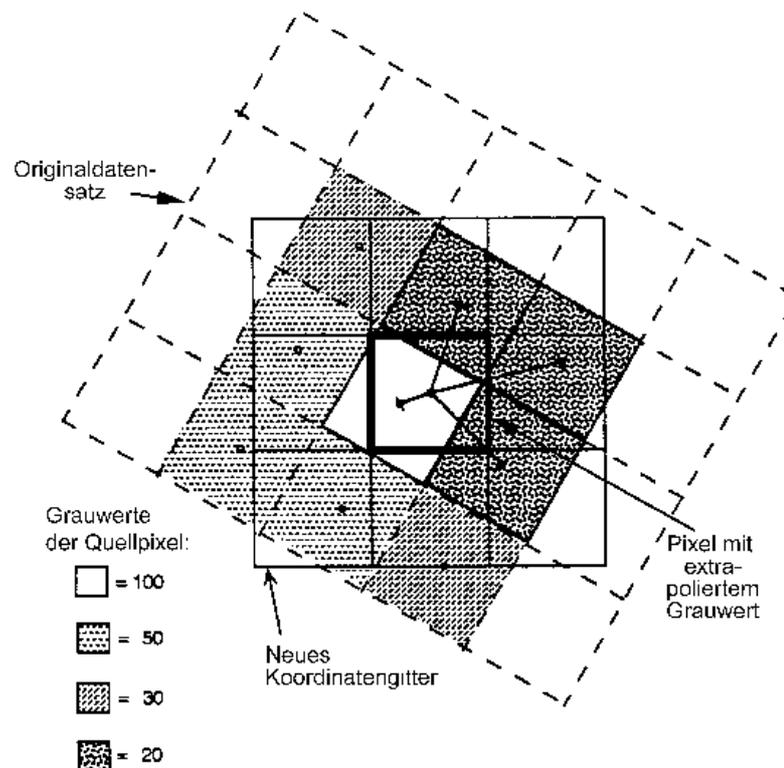
Druck (mbar)	Höhe (km)	Temperatur (°C)	abs. Luftfeuchte (%)	rel. Luftfeuchte (%)
1013	0	15.0	5.9	46
900	1	8.5	4.2	49
795	2	2.0	2.9	52
701	3	-4.5	1.8	51
616	4	-11.0	1.1	50
540	5	-17.5	0.6	48

Quelle: GEOSYSTEMS 1999, S. 68



Resampling-Methode: Nächster Nachbar

Abb. B.1: Modell des Resamplingverfahrens „Nächster Nachbar“. Quelle: VERBYLA 1995, S. 99



Resampling-Methode: Bilineare Interpolation

Abb. B.2: Modell des Resamplingverfahrens „Bilineare Interpolation“. Quelle: VERBYLA 1995, S. 100

Tab. B.3: Vergleichende Gegenüberstellung der Statistiken in DN-Werten und in Prozentwerten für den Landsat-TM-Ausschnitt vom 01.05.1986

Kanal	Min. DN	Min. %	Max. DN	Max. %	Konzentrationsbereich DN	Konzentrationsbereich %	Histogrammkurve, rad. Eigensch. DN	Histogrammkurve, rad. Eigensch. %	STA DN	STA %	Arith. Mittel DN	Arith. Mittel %
1	1	1	221	87	3-52	1-21	Gipfel:17,27,34, recht dunkel u. homogen	Gipfel: 6, sehr dunkel u. homogen	8,840	3,577	19,617	7,641
2	1	1	228	89	3-57	2-23	Gipfel: 16,24, sehr dunkel u. homogen	Gipfel: 6,9, sehr dunkel u. homogen	10,676	4,142	22,478	8,847
3	1	1	242	94	1-67	2-27	Gipfel: 22 mit vielen benachbarten kleineren peaks, sehr dunkel, recht homogen	Gipfel: 8, sehr dunkel u. homogen	12,749	4,788	22,658	8,740
4	1	1	254	99	1-139	1-54	Gipfel: 4,47, recht dunkel u. inhomogen	Gipfel: 1,17,20,33, sehr dunkel u. recht homogen	21,881	8,470	56,474	22,128
5	1	1	215	84	1-90	1-37	Gipfel: 2,24, insg. sehr unruhiger Verlauf, recht dunkel u. inhomogen	Gipfel: 1,11,17, sehr dunkel u. recht homogen	15,550	5,893	44,859	17,551
6	34	8	118	27	37-110	8-26	Gipfel: 42,76, eher dunkel, recht homogen	Gipfel: 9,18, sehr dunkel u. homogen	10,320	2,418	78,642	18,054
7	1	1	233	91	1-86	1-34	Gipfel: 2,17,32, sehr dunkel, bei unruhigem Verlauf recht homogen	Gipfel: 1,7,11 sehr dunkel, recht homogen	15,406	5,849	33,336	13,122

Quelle: ERDAS Imagine: Image Info, verändert

Tab. B.4: Vergleichende Gegenüberstellung der Statistiken in DN-Werten und in Prozentwerten für den Landsat-TM-Ausschnitt vom 17.05.1986

Kanal	Min. DN	Min. %	Max. DN	Max. %	Konzentrationsbereich DN	Konzentrationsbereich %	Histogrammkurve, rad. Eigensch. DN	Histogrammkurve, rad. Eigensch. %	STA DN	STA %	Arith. Mittel DN	Arith. Mittel %
1	4	2	92	37	6-37	2-16	Gipfel: 14, sehr dunkel u. homogen	Gipfel: 6, sehr dunkel u. homogen	5,489	2,094	17,070	7,108
2	1	2	128	52	3-42	5-18	Gipfel: 13,17,25, sehr dunkel u. homogen	Gipfel: 10, sehr dunkel u. homogen	6,603	2,617	18,061	9,205
3	1	1	150	59	3-50	3-22	Gipfel: 11, sehr dunkel u. homogen, leicht positiv schief	Gipfel: 7, sehr dunkel, u. homogen, leicht positiv schief	8,398	3,092	17,056	8,041
4	1	1	166	66	2-135	2-54	Gipfel: 7,45,54,64,75,82, 93,104,114 recht dunkel u. inhomogen bei unruhigem Verlauf	Gipfel: 4,18,25,39 recht dunkel u. inhomogen bei unruhigem Verlauf	21,579	8,280	62,585	26,604
5	1	1	175	70	3-76	2-30	Gipfel: 5,38, recht dunkel u. inhomogen bei unruhigem Verlauf	Gipfel: 3,17, sehr dunkel, recht homogen	10,806	4,146	38,013	15,824
6	64	12	191	40	64-167	12-37	Gipfel: 64,119, DNs im mittleren Bereich, homogen	Gipfel: 22,29, sehr dunkel u. homogen	17,238	3,749	116,193	23,296
7	1	1	175	69	2-72	1-29	Gipfel: 5,22, sehr dunkel, recht homogen, positiv schief	Gipfel: 3,10, sehr dunkel, recht homogen, positiv schief	11,437	4,444	26,208	10,981

Quelle: ERDAS Imagine: Image Info, verändert

Tab. B.5: Vergleichende Gegenüberstellung der Statistiken in DN-Werten und in Prozentwerten für den Landsat-TM-Ausschnitt vom 02.07.1991

Kanal	Min. DN	Min. %	Max. DN	Max. %	Konzentrationsbereich DN	Konzentrationsbereich %	Histogrammkurve, rad. Eigensch. DN	Histogrammkurve, rad. Eigensch. %	STA DN	STA %	Arith. Mittel DN	Arith. Mittel %
1	7	2	170	66	10-42	2-17	Gipfel: 15, sehr dunkel u. homogen	Gipfel: 5, sehr dunkel u. homogen	5,564	2,367	17,891	6,979
2	1	2	255	127	10-42	3-18	Gipfel: 14,19,28, sehr dunkel u. homogen	Gipfel: 6, sehr dunkel u. homogen	6,702	2,566	19,040	7,543
3	1	1	255	112	7-49	2-20	Gipfel: 13, sehr dunkel u. homogen, leicht positiv schief	Gipfel: 5,9, sehr dunkel u. homogen, leicht positiv schief	9,203	3,535	19,409	7,620
4	1	1	255	112	1-186	1-73	Gipfel: 6,55,71,85,97,109, 123, eher dunkel, inhomogen	Gipfel: 3,20, danach unruhiger Verlauf recht dunkel, inhomogen	28,849	11,124	79,058	30,621
5	1	1	176	69	1-70	1-28	Gipfel: 2,28,41, recht dunkel u. inhomogen	Gipfel: 1,16, sehr dunkel u. homogen	10,709	4,047	36,700	14,435
6	113	17	199	39	115-185	18-36	Gipfel: 120,144,167, DN's im mittleren Bereich, homogen	Gipfel: 19,26, recht dunkel u. homogen	9,750	2,400	151,884	27,155
7	1	1	255	107	1-49	1-22	Gipfel: 11,21,23, sehr dunkel, recht homogen	Gipfel: 4,8, sehr dunkel u. homogen	8,459	3,305	18,777	7,339

Quelle: ERDAS Imagine: Image Info, verändert

Tab. B.6: Vergleichende Gegenüberstellung der Statistiken in DN-Werten und in Prozentwerten für den Landsat-MSS-Ausschnitt vom 02.07.1991

Kanal	Min. DN	Min. %	Max. DN	Max. %	Konzentrationsbereich DN	Konzentrationsbereich %	Histogrammkurve, rad. Eigensch. DN	Histogrammkurve, rad. Eigensch. %	STA DN	STA %	Arith. Mittel DN	Arith. Mittel %
1	30	6	255	69	32-103	8-26	Gipfel: 44, recht dunkel u. homogen	Gipfel: 12,15,18, sehr dunkel u. homogen	12,672	2,958	56,533	13,843
2	9	2	202	51	16-61	3-18	Gipfel: 20,35, sehr dunkel u. recht homogen, leicht positiv schief	Gipfel: 5,9, sehr dunkel u. homogen, leicht positiv schief	10,737	2,672	29,017	7,322
3	5	1	227	56	10-176	2-42	Gipfel: 16,82, insg. unruhiger Verlauf, eher dunkel, recht inhomogen, negativ schief	Gipfel: 5,19,22,26, sehr dunkel, recht inhomogen	24,382	6,059	87,690	21,128
4	2	1	255	74	7-255	2-64	Gipfel: 22,101, ab 83 sehr unruhiger Verlauf, DN's im mittleren Bereich gehäuft	Gipfel: 5,25,35 recht unruhiger Verlauf, eher dunkel	38,410	9,471	126,114	31,041

Quelle: ERDAS Imagine: Image Info, verändert

Tab. B.7: Kanalweiser Vergleich der radiometrischen Eigenschaften der drei Landsat-TM-Szenen:

Kanal 1:

Datum	Min. DN	Min. %	Max. DN	Max. %	Konzentrationsbereich DN	Konzentrationsbereich %	Histogrammkurve, rad. Eigensch. DN	Histogrammkurve, rad. Eigensch. %	STA DN	STA %	Arith. Mittel DN	Arith. Mittel %
01.05.86	1	1	221	87	3-52	1-21	Gipfel:17,27,34, recht dunkel u. homogen	Gipfel: 6, sehr dunkel u. homogen	8,840	3,577	19,617	7,641
17.05.86	4	2	92	37	6-37	2-16	Gipfel: 14, sehr dunkel u. homogen	Gipfel: 6, sehr dunkel u. homogen	5,489	2,094	17,070	7,108
02.07.91	7	2	170	66	10-42	2-17	Gipfel: 15, sehr dunkel u. homogen	Gipfel: 5, sehr dunkel u. homogen	5,564	2,367	17,891	6,979

Kanal 2:

Datum	Min. DN	Min. %	Max. DN	Max. %	Konzentrationsbereich DN	Konzentrationsbereich %	Histogrammkurve, rad. Eigensch. DN	Histogrammkurve, rad. Eigensch. %	STA DN	STA %	Arith. Mittel DN	Arith. Mittel %
01.05.86	1	1	228	89	3-57	2-23	Gipfel: 16,24, sehr dunkel u. homogen	Gipfel: 6,9, sehr dunkel u. homogen	10,676	4,142	22,478	8,847
17.05.86	1	2	128	52	3-42	5-18	Gipfel: 13,17,25, sehr dunkel u. homogen	Gipfel: 10, sehr dunkel u. homogen	6,603	2,617	18,061	9,205
02.07.91	1	2	255	127	10-42	3-18	Gipfel: 14,19,28, sehr dunkel u. homogen	Gipfel: 6, sehr dunkel u. homogen	6,702	2,566	19,040	7,543

Kanal 3:

Datum	Min. DN	Min. %	Max. DN	Max. %	Konzentrationsbereich DN	Konzentrationsbereich %	Histogrammkurve, rad. Eigensch. DN	Histogrammkurve, rad. Eigensch. %	STA DN	STA %	Arith. Mittel DN	Arith. Mittel %
01.05.86	1	1	242	94	1-67	2-27	Gipfel: 22 mit vielen benachbarten kleineren peaks, sehr dunkel, recht homogen	Gipfel: 8, sehr dunkel u. homogen	12,749	4,788	22,658	8,740
17.05.86	1	1	150	59	3-50	3-22	Gipfel: 11, sehr dunkel u. homogen, leicht positiv schief	Gipfel: 7, sehr dunkel, u. homogen, leicht positiv schief	8,398	3,092	17,056	8,041
02.07.91	1	1	255	112	7-49	2-20	Gipfel: 13, sehr dunkel u. homogen, leicht positiv schief	Gipfel: 5,9, sehr dunkel u. homogen, leicht positiv schief	9,203	3,535	19,409	7,620

## Kanal 4:

Datum	Min. DN	Min. %	Max. DN	Max. %	Konzentrationsbereich DN	Konzentrationsbereich %	Histogrammkurve, rad. Eigensch. DN	Histogrammkurve, rad. Eigensch. %	STA DN	STA %	Arith. Mittel DN	Arith. Mittel %
01.05.86	1	1	254	99	1-139	1-54	Gipfel: 4,47, recht dunkel u. inhomogen	Gipfel: 1,17,20,33, sehr dunkel u. recht homogen	21,881	8,470	56,474	22,128
17.05.86	1	1	166	66	2-135	2-54	Gipfel: 7,45,54,64,75,82, 93,104,114 recht dunkel u. inhomogen bei unruhigem Verlauf	Gipfel: 4,18,25,39 recht dunkel u. inhomogen bei unruhigem Verlauf	21,579	8,280	62,585	26,604
02.07.91	1	1	255	112	1-186	1-73	Gipfel: 6,55,71,85,97,109, 123, eher dunkel, inhomogen	Gipfel: 3,20, danach unruhiger Verlauf recht dunkel, inhomogen	28,849	11,124	79,058	30,621

## Kanal 5:

Datum	Min. DN	Min. %	Max. DN	Max. %	Konzentrationsbereich DN	Konzentrationsbereich %	Histogrammkurve, rad. Eigensch. DN	Histogrammkurve, rad. Eigensch. %	STA DN	STA %	Arith. Mittel DN	Arith. Mittel %
01.05.86	1	1	215	84	1-90	1-37	Gipfel: 2,24, insg. sehr unruhiger Verlauf, recht dunkel u. inhomogen	Gipfel: 1,11,17, sehr dunkel u. recht homogen	15,550	5,893	44,859	17,551
17.05.86	1	1	175	70	3-76	2-30	Gipfel: 5,38, recht dunkel u. inhomogen bei unruhigem Verlauf	Gipfel: 3,17, sehr dunkel, recht homogen	10,806	4,146	38,013	15,824
02.07.91	1	1	176	69	1-70	1-28	Gipfel: 2,28,41, recht dunkel u. inhomogen	Gipfel: 1,16, sehr dunkel u. homogen	10,709	4,047	36,700	14,435

## Kanal 6:

Datum	Min. DN	Min. %	Max. DN	Max. %	Konzentrationsbereich DN	Konzentrationsbereich %	Histogrammkurve, rad. Eigensch. DN	Histogrammkurve, rad. Eigensch. %	STA DN	STA %	Arith. Mittel DN	Arith. Mittel %
01.05.86	34	8	118	27	37-110	8-26	Gipfel: 42,76, eher dunkel, recht homogen	Gipfel: 9,18, sehr dunkel u. homogen	10,320	2,418	78,642	18,054
17.05.86	64	12	191	40	64-167	12-37	Gipfel: 64,119, DNs im mittleren Bereich, homogen	Gipfel: 22,29, sehr dunkel u. homogen	17,238	3,749	116,193	23,296
02.07.91	113	17	199	39	115-185	18-36	Gipfel: 120,144,167, DNs im mittleren Bereich, homogen	Gipfel: 19,26, recht dunkel u. homogen	9,750	2,400	151,884	27,155

Kanal 7:

Datum	Min. DN	Min. %	Max. DN	Max. %	Konzentrationsbereich DN	Konzentrationsbereich %	Histogrammkurve, rad. Eigensch. DN	Histogrammkurve, rad. Eigensch. %	STA DN	STA %	Arith. Mittel DN	Arith. Mittel %
01.05.86	1	1	233	91	1-86	1-34	Gipfel: 2,17,32, sehr dunkel, bei unruhigem Verlauf recht homogen	Gipfel: 1,7,11 sehr dunkel, recht homogen	15,406	5,849	33,336	13,122
17.05.86	1	1	175	69	2-72	1-29	Gipfel: 5,22, sehr dunkel, recht homogen, positiv schief	Gipfel: 3,10, sehr dunkel, recht homogen, positiv schief	11,437	4,444	26,208	10,981
02.07.91	1	1	255	107	1-49	1-22	Gipfel: 11,21,23, sehr dunkel, recht homogen	Gipfel: 4,8, sehr dunkel u. homogen	8,459	3,305	18,777	7,339

Quelle: ERDAS Imagine: Image Info, verändert