

# Satellitengestützte Waldflächenkartierung für die Bundeswaldinventur

DISSERTATION

zur Erlangung des Doktorgrades

des Departments Biologie  
der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften  
an der Universität Hamburg

vorgelegt von

KATJA OEHMICHEN

aus Löbau

Hamburg 2007

Genehmigt vom Department Biologie  
der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften  
an der Universität Hamburg  
auf Antrag von Professor Dr. M. KÖHL  
Weiterer Gutachter der Dissertation:  
Herr Professor Dr. E. CSAPLOVICS  
Tag der Disputation: 04.Dezember 2006

Hamburg, den 11. November 2006



Professor Dr. Reinhard Lieberei  
Leiter des Departments Biologie

FÜR JAN

## Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand am Institut für Forstökologie und Walderfassung Eberswalde der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft im Rahmen des Forschungsprojektes „Weiterentwicklung der Bundeswaldinventur durch Integration von Erdbeobachtungsdaten“ (Förderkennzeichen 50EE0201), welches dankenswerterweise vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) getragen und vom Bundesministerium für Bildung und Forschung finanziert wurde.

Herrn Prof. Dr. M. Köhl danke ich herzlich für die fundierten fachlichen Diskussionen, zahlreichen Anregungen und die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit, den mir damit zur Verfügung gestellten Freiraum und die Übernahme des Gutachtens.

Herrn Prof. Dr. E. Csaplovics möchte ich für die Bereitschaft zur Begutachtung der vorliegenden Arbeit meinen Dank aussprechen.

Für die nun schon langjährige, interessante und oft auch „aufklärende“ Zusammenarbeit möchte ich den zahlreichen Fernerkundlern danken, die ich durch mein Vordringen in diesen Fachkreis kennengelernt habe. Dabei konnten viele große und kleine Tips und Kniffe ausgetauscht werden, die ansonsten möglicherweise verborgen geblieben wären. Erwähnt seinen insbesondere Frau C. Kummer und Herr H. Sagischewski von der Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei, Herr Dr. B. Coenradie und Herr M. Förster vom Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung der TU Berlin, Herr J. Krüger von der Abteilung für Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme der Universität Freiburg, Frau A. Frick von der Firma Luftbild und Planung Potsdam, Frau K. Tröltzsch vom European Forest Institute in Joensuu, Finnland, und Herr Dr. K. Steinnocher von der Austrian Research Centre Systems Research GmbH in Seibersdorf, Österreich. Ein großes Dankeschön geht an Herrn M. Keil von der DLR, der mir jederzeit mit Ratschlägen und fachlichen Diskussionen zur Seite stand. Und nicht zuletzt möchte ich dem ehemaligen Team der Professur für Biometrie und Forstliche Informatik der TU Dresden meinen Dank für die nicht nur fachliche Unterstützung aussprechen.

Hiermit bedanke ich mich ebenfalls bei den Mitarbeitern des Projektes WEI-BWI Herrn A. Iost, Herrn T. Riedel, Herrn F. Kroihner und dem Projektleiter Herrn Dr. H. Polley, denn nicht nur die Projekttreffen sondern auch die Zusammenarbeit war für alle eine wichtige Erfahrung.

Ein besonderes Dankeschön gilt dem kritischen und aufmerksamen Korrekturleser Herrn Dr. Wolfgang Stümer, insbesondere für die wertvollen Anmerkungen.

Ebenso möchte ich Herrn Dr. W. Lux, Herrn Dr. W. Seidling, Herrn F. Schwitzgebel und ganz besonders Frau Dr. N. Wellbrock der BFH Eberswalde meinen Dank zukommen lassen, die mir des öfteren weit über ein dienstliches und kollegiales Maß hinaus in guten aber auch weniger produktiven Phasen meiner Arbeit Beistand geleistet und mir so manch hilfreichen taktischen Tip mit auf den Weg gegeben haben.

Der größte Dank gebührt Herrn J. Willkommen, der mir sowohl fachliche als auch moralische Unterstützung während des gesamten Zeitraumes der Anfertigung dieser Arbeit zukommen ließ und mir immer wieder Kraft gab, mein Ziel ehrgeizig zu verfolgen.

## Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wird ein aus terrestrischen Daten und satellitengestützter Erdbeobachtung kombinierter Verfahrensvorschlag unterbreitet, mit dem Wald- und Nichtwaldflächen als Parameter forstlicher Großrauminventuren ermittelt werden können. Die Datengrundlage bilden Satellitenszenen der Sensoren Landsat 5, Landsat 7 und QuickBird und die auf Stichprobenbasis erhobenen Informationen der terrestrischen Bundeswaldinventur.

Die Waldfläche ist ein entscheidendes Schlüsselmerkmal aller Waldinventuren, da diese in sämtliche flächenbezogene Zielgrößen eingeht. Mit dem entwickelten Verfahren wird eine flächendeckende Trennung bestockter und nicht bestockter Gebiete in Form von Holzbodenmasken zur Verfügung gestellt. Die Holzbodenmasken werden durch die Integration digitaler Zusatzdaten an die BWI-Walddefinition adaptiert, so dass basierend auf diesen Waldmasken auch Aussagen bezüglich der Waldflächen kleinerer Aussageeinheiten getroffen werden können.

Das vorgestellte Verfahren zur Erstellung von Waldmasken, welches an die Walddefinition der Bundeswaldinventur angelehnt ist, wird für fünf Untersuchungsgebiete mit Größen zwischen 3.600 km<sup>2</sup> und 10.000 km<sup>2</sup> evaluiert. Neben der Vorprozessierung der digitalen Daten steht die Genauigkeitsanalyse der Klassifikationsergebnisse im Fokus der Arbeit. Die Gesamtgenauigkeiten der weitestgehend automatisiert erstellten Waldmasken für die verschiedenen Gebiete liegen zwischen 92 % und 98 %. Daneben wird ein Vergleich hoch- und höchstauflösender Sensoren mittels Landsat 7- und QuickBird-Szenen durchgeführt.

## Summary

The presented thesis proposes a method for identifying forest and non-forest areas in large-scale forest inventories by combining remote sensing and field data. Landsat 5, Landsat 7 and QuickBird satellite images are providing the data source supplemented by the surveyed field data of the German national forest inventory „Bundeswaldinventur“.

Since all area based variables are directly or indirectly depending on the forest area, it constitutes a key parameter in forest inventories. The presented procedure results in a classification of non-forest and wooden ground. In order to meet the definition of forest used in the German national forest inventory these „wooden ground maps“ are adapted by using auxiliary data providing consistent information about the forest area even on a small scale, where the results of the German national forest inventory tend to become less reliable.

The suitability of the method was successfully evaluated on five large-scale investigation areas, varying in size from 3.600 km<sup>2</sup> to 10.000 km<sup>2</sup>. Beside the necessary data preparation the investigation focuses on the methodology and practical application of accuracy analysis which yielded accuracies between 92 % and 98 %. Additionally a comparison between high resolution (such as Landsat 7) and very high resolution satellite imagery (QuickBird) was performed.

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1	Zielsetzung . . . . .	2
1.2	Rahmenbedingung . . . . .	2
1.3	Aufbau der Arbeit . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Stand der Entwicklung</b>	<b>4</b>
2.1	Entwicklung von Fernerkundungssystemen und Sensoren . . . . .	4
2.1.1	Übersicht zu den verwendeten Sensorsystemen . . . . .	4
2.2	Verschiedene Ansätze zur Klassifizierung von Wald . . . . .	5
2.3	Einsatz von Fernerkundungsmethoden bei nationalen Waldinventuren . . . . .	8
<b>3</b>	<b>Datenmaterial und Untersuchungsgebiete</b>	<b>11</b>
3.1	Datenmaterial . . . . .	11
3.1.1	Terrestrische Daten . . . . .	11
3.1.2	Satellitendaten . . . . .	12
3.1.3	Digitale Zusatzdaten . . . . .	16
3.2	Untersuchungsgebiete . . . . .	19
3.2.1	Untersuchungsgebiet Westliches Mittelgebirge . . . . .	21
3.2.2	Untersuchungsgebiet Nordostdeutschland . . . . .	21
3.2.3	Untersuchungsgebiet Sachsen . . . . .	21
3.2.4	Untersuchungsgebiet Alpen . . . . .	22
3.2.5	Untersuchungsgebiet Pfälzerwald . . . . .	22
<b>4</b>	<b>Aufbereitung der Satellitendaten</b>	<b>24</b>
4.1	Geometrische Korrektur . . . . .	24
4.1.1	Georeferenzierung der QuickBird-Daten . . . . .	24
4.1.2	Georeferenzierung der Landsat-Daten . . . . .	25
4.2	Radiometrische Korrektur . . . . .	25
4.2.1	Atmosphärenkorrektur . . . . .	25
4.2.2	Topographische Normalisierung . . . . .	27
4.3	Fusion von Satellitendaten . . . . .	29
4.4	Vegetationsindizes . . . . .	31
<b>5</b>	<b>Methodik</b>	<b>33</b>
5.1	Hard- und Software . . . . .	33
5.2	Begriffsdefinition der Waldfläche . . . . .	33
5.3	Extraktion der spektralen Werte . . . . .	34
5.4	Verfahren zur Waldmaskenerstellung . . . . .	36

5.4.1	Waldmaskenerstellung über Bestockungstypinformationen . . . . .	36
5.4.2	Schwellenwertverfahren . . . . .	38
5.4.3	Bestimmung der Schwellenwerte . . . . .	38
5.5	Anpassung der Holzbodenmaske an die BWI-Walddefinition . . . . .	42
5.5.1	Medianfilterung . . . . .	43
5.5.2	Eliminierung von Kleinstholzbodenflächen . . . . .	44
5.5.3	Adaption der Holzbodenmaske durch Zusatzdaten an die BWI-Wald- definition . . . . .	45
5.6	Genauigkeitsanalyse . . . . .	46
5.6.1	Einführung . . . . .	46
5.6.2	Verfahren zur Genauigkeitsanalyse . . . . .	47
5.6.3	Faktoren der Genauigkeitsanalyse . . . . .	48
5.6.4	Bewertung der Genauigkeitsanalyse . . . . .	50
5.6.5	Einfluss der Referenzdaten . . . . .	51
5.6.6	Untersuchung des Einflusses abhängiger Referenzdaten . . . . .	52
<b>6</b>	<b>Ergebnisse</b>	<b>53</b>
6.1	Topographische Normalisierung . . . . .	53
6.2	Fusion von Satellitendaten . . . . .	54
6.3	Einfluss abhängiger Referenzdaten . . . . .	56
6.4	Schwellenwertverfahren . . . . .	58
6.4.1	Spektralwertextraktionen der Landsat-Daten . . . . .	58
6.4.2	Spektralwertextraktionen der QuickBird-Daten . . . . .	61
6.5	Bewertung der Waldmasken . . . . .	63
6.5.1	Genauigkeitsanalyse und Verifizierung der Waldmasken anhand des Un- tersuchungsgebietes Sachsen . . . . .	64
6.5.2	Bewertung der Waldmasken des Untersuchungsgebietes Westliches Mit- telgebirge . . . . .	71
6.5.3	Bewertung der Waldmasken des Untersuchungsgebietes Nordostdeutsch- land . . . . .	73
6.5.4	Bewertung der Waldmasken des Untersuchungsgebietes Alpen . . . . .	73
6.5.5	Bewertung der Waldmasken des Untersuchungsgebietes Pfälzerwald . . . . .	75
6.5.6	Bewertung der QuickBird-Waldmasken des Untersuchungsgebietes Pfälzer- wald . . . . .	76
6.5.7	Vergleich der Landsat 7- und QuickBird-Waldmaske des Untersuchsungs- gebietes Pfälzerwald . . . . .	78
6.5.8	Zusammenfassende Bewertung der Holzboden- und Waldmasken . . . . .	79
6.6	Veränderungsrechnung . . . . .	82
<b>7</b>	<b>Kostenübersicht</b>	<b>85</b>
<b>8</b>	<b>Diskussion und Fazit</b>	<b>88</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>92</b>

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>94</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>101</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>103</b>

# 1 Einleitung

Die Bedeutung der Satellitenfernerkundung für Waldinventuren zählt zu den in der Vergangenheit intensiv untersuchten Forschungsthemen im Bereich der Forstwirtschaft. Trotz vieler Vorzüge der Fernerkundung konnten sich satellitengestützte Datenerhebungs- und Analysemethoden für Waldinventuren in Deutschland bisher nicht als operationales Verfahren durchsetzen. Auch bei den europäischen nationalen Walderhebungsprogrammen werden überwiegend terrestrische Aufnahmen durchgeführt. Wenn Methoden der Fernerkundung in eine Waldinventur integriert werden, dann betrifft das meist nur einen Teilaspekt des Verfahrens (z.B. Wald/Nichtwaldentscheid, Festlegung von Straten). Die ablehnende Haltung gegenüber dem Einsatz der Satellitenfernerkundung kann einerseits auf praktische Hindernisse zurückgeführt werden, wie beispielsweise schwierige Datenverfügbarkeit verbunden mit aufwendigen Auswertalgorithmen, die zumeist Zusatzdaten erfordern. Andererseits rührt die Skepsis möglicherweise auch von Auffassungsdifferenzen zwischen der intuitiven Verständlichkeit der traditionellen stichprobenbasierten Inventuren im Gegensatz zu den von vielen Einflussgrößen abhängigen, nicht standardisierten, flächenbasierten Fernerkundungsverfahren her.

Waldinventuren in Europa haben sich in den vergangenen Jahren weiterentwickelt. Nach wie vor spielt die Erhebung klassischer Inventurdaten eine wichtige Rolle, währenddessen die Erfassung ökologischer Merkmale zunehmend an Bedeutung gewinnt. So beschränken sich die Aufnahmen nicht mehr einzig und allein auf den Wald, sondern es werden über dessen Grenzen hinaus Daten aufgenommen, damit verstärkt Wissen über die waldnahe Landschaft gewonnen wird. Dieser Wandel ist unter anderem auf den gewachsenen Informationsbedarf von politischer Seite zurückzuführen, da Beiträge zur Erfüllung nationaler und internationaler Verträge, Programme und Initiativen (z. B. Klimaschutz (Kyoto-Protokoll), Pan-Europäischer Prozess zum Schutz der Wälder (Helsinki-Prozess), Monitoring von Landnutzungsveränderungen, Naturschutz (Natura 2000, FFH-Richtlinien)) und Instrumentarien für die Gestaltung und Durchführung der Holzmarkt-, Forst- und Umweltpolitik gefordert werden. Im Widerspruch dazu steht das immer knapper werdende finanzielle Budget der Waldinventuren.

Der Einsatz von Fernerkundungsdaten in Kombination mit terrestrischen Erhebungen der Waldinventuren stellt eine Alternative zur herkömmlichen Datenerfassung dar, durch die räumlich und thematisch differenziertere Auswertungen vorgenommen und Informationen in der benötigten thematischen Vielfalt bereitgestellt werden können. Dieser Ansatz wurde beispielsweise für die Schweizerische nationale Waldinventur (Landesforstinventar) angewandt, bei der die Interpretation kostenlos bereitgestellter Luftbilder zu verbesserten Genauigkeiten der Inventurergebnisse bei einer Reduzierung der Kosten (KÖHL (1994), BRASSEL und LISCHKE (2001)) führte.

## 1.1 Zielsetzung

Im Fokus dieser Arbeit steht die Erfassung von Waldflächen. Dieses Ziel mag auf den ersten Blick profan erscheinen, aber die Trennung zwischen Wald- und Nichtwaldflächen soll nicht nach einer speziell für Fernerkundungsdaten entwickelten Definition, sondern nach der der Bundeswaldinventur (BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (HRSG.) (2001)) erfolgen. Die Waldfläche spielt bei Walderhebungen eine Schlüsselrolle, denn sie fließt in die Ermittlung sämtlicher flächenbezogener Merkmale ein, wie Stammzahl, Vorrat und Nutzung. Im Gegensatz zur punktuellen Erfassung der Waldfläche durch eine Stichprobeninventur ist durch die Fernerkundung eine flächenhafte Aufnahme der Erdoberfläche und somit des Waldes möglich. Für repräsentative Aussagen sollten die Untersuchungen zur satellitengestützten Waldflächenerfassung im Rahmen der Bundeswaldinventur möglichst das gesamte Erscheinungsbild des Waldes in Deutschland umfassen, welches von lockeren Überschirmungen über kleinflächige, parzellierte Waldstrukturen bis hin zu geschlossenen, komplexen Wäldern reicht. Weiterhin werden mittels der Analysen zur Reproduzierbarkeit der BWI-Walddefinition drei verschiedene Sensoren (Landsat 5, Landsat 7 und QuickBird) evaluiert.

Da es sich bei der BWI um eine forstliche Großrauminventur handelt, wurden fünf Untersuchungsgebiete mit Flächengrößen zwischen  $3.600 \text{ km}^2$  und  $10.000 \text{ km}^2$  ausgewählt, was ein Novum im Vergleich zu bisherigen Studien ist. Die Erstellung eines Verfahrens zur Waldflächenextraktion aus Satellitenbildern erfordert eine Charakterisierung der Gesamtheit aller operationalen Schritte. Neben der Vorverarbeitung der Satellitenszenen und Bewertung des Einflusses ebendieser zählt die Erstellung der Waldmasken zum Schwerpunkt der Arbeit. In diesem Zusammenhang sei auch die Akquisition und Aufbereitung von digitalen Zusatzdaten genannt, deren Zeit- und Arbeitsaufwand nicht unterschätzt werden sollte.

Ein essentieller Bestandteil der Arbeit ist die Genauigkeitsanalyse, die sowohl methodisch als auch praxisbezogen in Form der Verifizierung der Waldmasken vorgestellt wird. Daraus kann das Eignungspotential der verschiedenen Sensoren für den Einsatz bei Waldinventuren abgeschätzt werden. Abschließend sind neben den Ergebnissen die Prämissen zu diskutieren, die für einen effektiven Einsatz solcherart erstellter Waldmasken eingehalten werden müssen.

## 1.2 Rahmenbedingung

Seit Ende der neunziger Jahre liefern kommerzielle Satellitensysteme einer neuen Generation, wie QuickBird und Ikonos, Aufnahmen, deren Auflösungen deutlich unter 5 m liegen. Durch diesen hohen Detaillierungsgrad eröffnen sich neue Perspektiven für den Einsatz der Fernerkundung im Forstbereich, so dass vor der routinierten und standardisierten praktischen Nutzbarmachung dieser Satellitendaten Forschungsbedarf zur Adaption und Entwicklung von Auswertelgorithmen besteht. Dieser Mangel an operationellen Verfahren trägt zum Verlust der Akzeptanz von Satellitendaten bei, da für potentielle Nutzer in Wirtschaft und Verwaltung keine praxisrelevanten Einsatzmöglichkeiten bestehen, was die Fernerkundung derzeit zunehmend

unter Kritik geraten lässt.

Um diesem Konflikt entgegenzuwirken, wurden in den vergangenen Jahren durch das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) unter finanzieller Beteiligung öffentlicher Einrichtungen und Wirtschaftsunternehmen verschiedene Projekte ins Leben gerufen, um das Anwendungspotential der satellitengestützten Erdbeobachtung weiterzuentwickeln. Mit dem Projekt „Weiterentwicklung der Bundeswaldinventur durch Integration von Erdbeobachtungsdaten“ (WEI-BWI) sollen Verfahrensvorschläge für die operationelle Nutzung in Waldinventuren entwickelt werden. Durch die Kooperation mit dem Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft, dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR), den Bundesländern und der Privatwirtschaft konnten konkrete Anforderungen aus Nutzerkreisen und fachspezifische Expertisen abgestimmt werden, um die routinemäßige Anwendung von Satellitendaten zu fördern.

### **1.3 Aufbau der Arbeit**

Die vorliegende Arbeit ist in acht Kapitel unterteilt. An die Einleitung (Kapitel 1) und Übersicht zum aktuellen Stand der Entwicklung (Kapitel 2) schließt sich mit dem dritten Kapitel die Vorstellung des verwendeten Datenmaterials und der Untersuchungsgebiete an. In Kapitel 4 wird die Vorprozessierung und Aufbereitung der Satellitendaten beschrieben, wobei geometrische und radiometrische Korrekturen sowie die Fusion von Satellitendaten im Vordergrund stehen. Die der Arbeit zugrunde liegende Methodik wird im fünften Kapitel vorgestellt, in das unter anderem die Verfahren zur Waldmaskenerstellung, die Anpassung der Holzbodenmaske an die BWI-Walddefinition und detaillierte Ausführungen zur Genauigkeitsbewertung integriert sind. Die aus den jeweiligen Arbeitsschritten resultierenden Ergebnisse werden in Kapitel 6 präsentiert. Darauf folgt eine Übersicht zu den Kosten (Kapitel 7). Mit der Diskussion der Ergebnisse und den damit verbundenen Erkenntnissen (Kapitel 8) endet die Arbeit.

## 2 Stand der Entwicklung

### 2.1 Entwicklung von Fernerkundungssystemen und Sensoren

Die Vielzahl operational verfügbarer Fernerkundungssysteme und Sensoren stellt ein enormes Informationspotential dar, deren fortschreitende Entwicklung immer höher aufgelöste Daten bereitstellt. Auch auf dem forstlichen Sektor ist der zunehmende Bedarf an aktuellen Informationen unumstritten, die u.a. von Internationalen Organisationen (European Commission, FAO, Eurostat, WWF), Ministerien, Forschungseinrichtungen und Universitäten sowie der Holzindustrie benötigt werden (LIN und PAIVINEN (1999)). Eine Übersicht ausgewählter operationaler Satelliten und ein Ausblick auf zukünftige Systeme ist in den Tabellen 2.3 und 2.4 zu finden (u.a. nach JACOBSEN (2005), ENVIRONMENTAL REMOTE SENSING CENTER (2005), CENTER FOR HEALTH APPLICATIONS OF AEROSPACE RELATED TECHNOLOGIES (2005)). Weitere Informationen zu Grundlagen der Fernerkundung und Fernerkundungssystemen finden sich u.a. bei HILDEBRANDT (1996), CAMPBELL (1996), RICHARDS und JIA (1999), LILLESAND und KIEFER (2000) und ALBERTZ (2001).

#### 2.1.1 Übersicht zu den verwendeten Sensorsystemen

##### Satellitensysteme Landsat 5-TM und Landsat 7-ETM<sup>+</sup>

Seit 1972 liefern die Satelliten der amerikanischen Landsat-Missionen multispektrale Aufnahmen der Erdoberfläche und sind somit das älteste kommerzielle und immer noch operative Satelliten-Erdbeobachtungsprogramm. Die zweite Generation der Landsat-Satelliten wurde mit dem Start von Landsat 5 im März 1984 fortgesetzt. Dieser ist neben dem Multispectralscanner (MSS) zusätzlich mit einem Thematic Mapper (TM) ausgestattet. Im April 1999 wurde der erste und bisher einzige Satellit der dritten Generation ins All geschickt, Landsat 7. Dessen Aufnahmen erfolgen mit einem Enhanced Thematic Mapper (ETM<sup>+</sup>). Eine Übersicht zu den Eigenschaften der Sensoren ist in Tabelle 2.1 zusammengefasst. Die Satelliten Landsat 5 und Landsat 7 fliegen in einer Höhe von 705 km mit einer Wiederholrate von 16 Tagen. Die Breite eines Aufnahmestreifens beträgt 183 km.

Seit Mai 2003 ist die Sensorfunktionalität von Landsat 7 nicht mehr vollständig verfügbar, da der Scan Line Corrector (SLC) ausgefallen ist. Dies führt zu einer Dopplung bzw. Nichtaufnahme von Daten, die maximal 22 % pro Szene beträgt<sup>1</sup>. Somit ist die bisher kontinuierliche Versorgung mit Landsat 7-Daten nicht mehr gewährleistet, so dass alternative Satellitendaten in Betracht gezogen werden müssen.

---

<sup>1</sup>[http://landsat.usgs.gov/slc\\_enhancements/slc\\_off\\_background.php](http://landsat.usgs.gov/slc_enhancements/slc_off_background.php), Stand: Juni 2005

Sensor	Kanal	spektrale Auflösung ( $\mu\text{m}$ )		geometrische Auflösung (m)
MSS	1	0,5 - 0,6	grün	80 x 80
	2	0,6 - 0,7	rot	80 x 80
	3	0,7 - 0,8	NIR	80 x 80
	4	0,8 - 1,1	NIR	80 x 80
TM	1	0,45 - 0,52	blau	30 x 30
	2	0,52 - 0,60	grün	30 x 30
	3	0,63 - 0,69	rot	30 x 30
	4	0,76 - 0,90	NIR	30 x 30
	5	1,55 - 1,75	MIR	30 x 30
	6	10,4 - 12,5	thermal	120 x 120
	7	2,08 - 2,35	MIR	30 x 30
ETM+	wie TM, allerdings höhere Auflösung des Kanals 6			60 x 60
	Pan	0,52 - 0,90	grün - NIR	15 x 15

Tabelle 2.1: Sensoreigenschaften des MSS und TM (Landsat 5) und ETM+ (Landsat 7)

### Satellitensystem QuickBird

Der Satellit QuickBird der amerikanischen Firma DigitalGlobe, der seit Oktober 2001 die Erde in einer Höhe von 450 km umkreist, stellt die derzeit hochauflösendsten, kommerziell verfügbaren Daten<sup>2</sup> bereit. Mit einer räumlichen Auflösung von 0,6 m (Nadir) im panchromatischen und 2,4 m (Nadir) im multispektralen Bereich heben sich diese Daten deutlich von denen anderer operationaler Systeme ab (Tabelle 2.2). Ein Aufnahmestreifen ist 16,5 km breit. Im Vergleich zu den Landsat 7-Daten ergibt sich eine um Faktor 12 gestiegene räumliche Auflösung im Multispektralbereich, der panchromatische Kanal löst sogar um Faktor 24 höher auf. Daraus resultiert im gleichen Zug ein erheblicher Anstieg des Datenvolumens. Ebenso sind die höheren Kosten für diese Daten zu berücksichtigen.

Sensor	Kanal	spektrale Auflösung ( $\mu\text{m}$ )		geometrische Auflösung (m)
QuickBird	1	0,45 - 0,52	blau	2,4 x 2,4
	2	0,52 - 0,60	grün	2,4 x 2,4
	3	0,63 - 0,69	rot	2,4 x 2,4
	4	0,76 - 0,90	NIR	2,4 x 2,4
	Pan	0,45 - 0,90	blau - NIR	0,6 x 0,6

Tabelle 2.2: QuickBird-Sensoreigenschaften (Nadir)

## 2.2 Verschiedene Ansätze zur Klassifizierung von Wald

Aufgrund der fortschreitenden Entwicklung neuer Sensoren sind die Einsatzmöglichkeiten und die Nachfrage nach Satellitenbilddaten für forstliche Zwecke gewachsen. Damit einher gehen

<sup>2</sup><http://www.eurimage.com>, Stand: Mai 2005

Weiter- und Neuentwicklungen der Auswertelgorithmen für hochauflösende Satellitendaten, die an den gestiegenen Informationsbedarf der Inventuren und des Monitorings von Wäldern angepasst werden.

Für die Ausweisung unterschiedlicher Landbedeckungsarten und die Klassifizierung von Waldflächen stehen pixelbasierte, objektbasierte und kombinierte Verfahren zur Auswahl. Weit verbreitet ist der pixelbasierte Ansatz, bei dem jedes einzelne Pixel analysiert und nach spektralen Ähnlichkeiten und statistischen Merkmalen in Klassen sortiert wird. Zu diesen Klassifizierungsalgorithmen zählen unter anderem der Maximum-Likelihood-, Minimum Distance- und Parallelepiped-Klassifikator, die in der einschlägigen Literatur vielfach beschrieben sind.

Die erste großflächige Landnutzungskartierung in Deutschland wurde von HABERÄCKER ET AL. (1979) mit Landsat-MSS-Daten durchgeführt. Für die Klassen Laub- und Nadelwald des Kartenblattes Mannheim wurden Genauigkeiten zwischen 60 % und 70 % erreicht. Mit der Zielstellung einer Waldkartierung für große Teile Bayerns grenzten KEIL ET AL. (1990) bewaldete und nicht bewaldete Gebiete durch ein Schwellenwertverfahren voneinander ab. Durch die Verwendung von Landsat 5-Szenen verschiedener Jahreszeiten und die Integration von Zusatzinformationen aus Waldlayern Topographischer Karten konnte die Trennung deutlich verbessert werden. Eine für die gesamte Fläche repräsentative und statistisch abgesicherte Verifizierung war nicht möglich, zumal die multitemporale Auswertung geometrische Abweichungen an Waldrändern nach sich gezogen hatte. Deshalb konnten nur Abschätzungen für Teilgebiete durchgeführt werden, für die Genauigkeiten der Wald/Nichtwaldtrennung von über 95 % erreicht wurden. Nach dieser Vorab-Stratifizierung erfolgten weitere Bestandesdifferenzierungen mittels der Maximum-Likelihood-Klassifizierung (*MLK*), wobei die mittlere Genauigkeit der sechs Hauptklassen zwischen 78 % und 85,2 % lag. SCHARDT (1990) hat anhand von drei Untersuchungsgebieten im Schwarzwald und Oberrheintal gezeigt, dass neben einer multitemporalen Wald/Nichtwaldtrennung auch weitere Klassifizierungen von Baumarten und Altersklassen mit Landsat 5-Daten realisierbar sind. Neben dem Schwellenwertverfahren für die Stratifizierung größerer Kategorien wie Wald und Nichtwald oder Laub- und Nadelwald kamen innerhalb dieser Klassen eine *MLK* und Medianfilter zur Verbesserung der Klassifizierung zum Einsatz. FRANZEN ET AL. (1998) wendeten zur Erfassung von Wald innerhalb der Waldgrenze für ein Untersuchungsgebiet im Burgenland (Österreich) basierend auf IRS-1C Daten ein aus unüberwachter Klassifizierung bzw. Schwellenwertbildung kombiniertes Verfahren an. Die nachfolgende Klassifikation der Waldtypen Nadel-, Misch- und Laubwald anhand der *MLK* führte zu Klassifikationsgenauigkeiten zwischen 89 % und 94 %. KOCH ET AL. (2003) erzielten für zwei in der Schweiz gelegene Testgebiete mit fusionierten IRS-1D PAN-Daten und Landsat 7-Daten Gesamtgenauigkeiten von 92 % und 94 % für die pixelbasiert klassifizierten Waldmasken.

Als weitere Methode sei das „k-Nächste-Nachbarn“-Verfahren genannt, ein nicht-parametrischer Klassifizierungsalgorithmus, welcher Zuweisungen von Pixeln in Merkmalsräume aufgrund bekannter spektraler Eigenschaften von Referenzpixeln vornimmt. TOMPPÖ (1993) etablierte dieses Verfahren in der finnischen nationalen Forstinventur, KÖHL ET AL. (2001) setzten im Rahmen des ProSmart-Projektes eine erweiterte Anwendung der k-nearest-neighbour-Methode für kategoriale Daten um, STÜMER und KÖHL (2005) nutzten das kNN-Verfahren zur Kartierung von Grundfläche und Totholz. Die Eignung des Verfahrens zur Ableitung österreichi-

scher Waldinventurmerkmale aus Landsat 5-Daten wurde von KOUKAL (2004) evaluiert. Ein Ergebnis dieser Untersuchungen sind u.a. Wald-/Nichtwald-Karten, deren visueller Vergleich mit Luftbildern sehr gute Übereinstimmungen ergab. IOST ET AL. (2006) führten mit der kNN-Methode Waldklassifizierungen für Landsat 7-Daten durch, deren Genauigkeiten mittels luftbildgestützter Überprüfung zwischen 87,8 % und 95,1 % lagen. Die für die Kartierung der Merkmale Alter und Baumartenmischung ermittelten Klassifizierungsgenauigkeiten zeigten, dass das Verfahren für diese Parameter nur bedingt bzw. nicht geeignet ist.

Eine andere Methodik liegt der objektbasierten Klassifizierung zu Grunde, die vor allem durch die steigende geometrische Auflösung der Satellitendaten an Bedeutung gewinnt. Dabei wird von der Annahme ausgegangen, dass benachbarte Pixel mit hoher Wahrscheinlichkeit der gleichen Klasse zugehören, so dass die Bilddaten in homogene Objekte segmentiert werden. Der Vorteil des Verfahrens besteht darin, dass für den Schritt der Objektabgrenzung mittels eines iterativ festzulegenden Skalierungsfaktors auch zusätzliche Informationen, wie GIS-Daten, hinzugezogen werden können. Dadurch wird jedoch die Übertragbarkeit des Verfahrens eingeschränkt und durch die Bildung homogener Objekte können Details, wie Bestandeslücken, Blößen oder Mischungsverhältnisse, verlorengehen. Einen Überblick zu derzeit verfügbaren Segmentierungsprogrammen gibt die Arbeit von MEINEL und NEUBERT (2004), in der das Potential von sieben Softwareprodukten mittels panchromatisch geschärfter IKONOS-Multispektraldaten für zwei Gebiete mit einer Größe von jeweils 4 km<sup>2</sup> gegenübergestellt wird. Das Prinzip der Bildsegmentierung und der objektorientierten, hierarchischen Klassifizierung wurde von TRÖLTZSCH (2004) anhand von Aster- und Landsat 7-Daten für zwei 16 km<sup>2</sup> große Gebiete in Sachsen untersucht. Über die Einbindung von zusätzlichen Informationen, wie ATKIS-Siedlungsdaten und Details aus Luftbildern, wurden binäre Waldmasken mit Genauigkeiten zwischen 97 % und 99 % ermittelt, die Grundlage für weitere Waldstrukturklassifizierungen bildeten. SAGISCHEWSKI ET AL. (2003) entwickelten anhand von zwei Untersuchungsgebieten in Thüringen (729 km<sup>2</sup> und 1332 km<sup>2</sup>) ein fernerkundungsbasiertes Verfahren mittels fusionierter Landsat 5- und IRS-1C PAN-Daten zur Erstellung eines Waldflächenverzeichnisses. Die objektbasierte Wald-/Nichtwaldkartierung war Grundlage für weitere Abgrenzungen von Hauptbaumarten und Wuchsklassen, die sowohl pixel- als auch objektbasiert durchgeführt wurden. Die Verifizierung der Waldmasken ergab eine Nutzergenauigkeit von 94,9 % und eine Herstellergenauigkeit von 97,3 %. Bei der Baumartenklassifizierung lieferte der segmentbasierte Ansatz im Vergleich zum pixelbasierten deutlich bessere Ergebnisse. In der Studie von WHITESIDE und AHMAD (2005) wurde eine Landnutzungsklassifizierung für ein 14 km<sup>2</sup> großes, dicht bewaldetes Gebiet in Australien mit Aster-Daten objekt- und pixelbasiert durchgeführt. Die objektbasierte Methode zeigte mit 78 % versus 69,1 % bessere Gesamtgenauigkeiten, wobei Fehlzugeweisungen der pixelbasierten Klassifizierung in spektral heterogenen Gebieten aufgetreten sind.

Die Vielzahl verschiedener digitaler Zusatzinformationen, die in die Klassifizierungsverfahren integriert werden können, hat zur zunehmenden Entwicklung und Anwendung von kombinierten Verfahren beigetragen. So wurden von COENRADIE ET AL. (2002) für die Ableitung von Waldstrukturklassen für Gebiete im Erzgebirge und der Dübener Heide aus IRS-, Spot- und Landsat 7-Daten die Segmentierungsergebnisse mit Resultaten einer hierarchischen pixelbasierten Klassifikation gekoppelt. KOCH ET AL. (2003) erachten einen ebensolchen kombinier-

ten Ansatz als klassifikationsverbessernd, da einerseits Objekte entsprechend der Bedürfnisse und Datengrundlage der Nutzer ausgewiesen werden können, andererseits auch differenzierte Informationen über die Objekte erfasst werden. Der Aufbau komplexer wissensbasierter Klassifizierungsalgorithmen trägt u.a. zur qualitativen Verbesserung von Ergebnissen aber auch zur Automatisierung von Verfahrensabläufen bei. FRICK (2005) nutzt beispielsweise zum Monitoring von Natura-2000-Gebieten unter Verwendung von QuickBird-Daten ein hierarchisch aufgebautes, wissensbasiertes pixelorientiertes Klassifikationsschema. Darüber hinaus können höhere Klassifikationsgenauigkeiten durch geeignete Verfahren der Datenvorverarbeitung, wie Datenfusionen, multitemporale Auswertungen und durch Nachbearbeitung der Daten, wie Verknüpfungen mit Zusatzdaten und Einsatz von Filtern, erreicht werden.

### **2.3 Einsatz von Fernerkundungsmethoden bei nationalen Waldinventuren**

Im Mittelpunkt nationaler Waldinventuren steht die Erhebung forstlicher Parameter und deren Bewertung über lange Zeiträume. Die Ermittlung der Inventurgrößen erfolgt über die Auswertung der terrestrischen Stichproben. Die Einbindung von Fernerkundungsdaten in großräumige Waldinventuren verspricht eine Reduzierung des Stichprobenumfangs, womit Kosteneinsparungen verbunden sind und eine Übertragung punktueller Bestandesparameter auf die Fläche umgesetzt werden kann (DAHM (1995), TOMPPÖ und PEKKARINEN (1997), KÖHL (1994), DEES ET AL. (1998), DEES (1996)). Da nicht alle existierenden und zukünftigen Inventurparameter mittels Einsatz von Fernerkundung erfasst werden können, ist eine Abgrenzung bzw. spezifische Anforderungsbeschreibung an die Fernerkundungsdaten erforderlich, um diese effizient einzusetzen. Dass dies gelungen ist, zeigen 16 europäische Länder, die für den Waldentscheid in nationalen Waldinventuren ein aus Fernerkundungs- und terrestrischen Daten kombiniertes Verfahren nutzen. Dabei finden Fernerkundungsdaten auch Anwendung bei der Bestimmung von Bestockungsgrad, Bestandesbreite, Bestandesgröße, Baumhöhen und der Landnutzungsbeurteilung. Jedoch gibt es nach wie vor Aufgabenfelder, für die selbst weiterentwickelte Sensoren oder Kameras nicht die gewünschten Informationen liefern können (KÖHL und PÄIVINEN (1996), HOLMGREN und THURESSON (1998), KÖHL und LAUTNER (2001)), zu denen unter anderem die Erfassung von Stammschäden, Totholz und der Bestandesstruktur zählen.

Mission	Betreiber	Start	Sensor	Typ	Anzahl Kanäle	Auflösung (m)	Szenenbreite (km)	Wiederholung (Tage)
Landsat-5	USA	1984	TM	ms	6 1	30 120	185	16
SPOT-1/2/3	Frankreich	1986/	HRV	ms	3	20	2*60	2 bis 3
		90/93		pan	1	10		
IRS-1B	Indien	1991	LISS-I	ms	4	72.5	148	22
			LISS-II	ms	4	36.25	2*74	22
NOAA-14	US	1994	AVHRR-2	ms	5	1100	3000	0.5
IRS-1C	Indien	1995	WiFS	ms	2	188	810	5 bis 24
			LISS-III	ms	3	23.5	141	24
			Pan	pan	1	70.5	148	5 bis 24
ERS-2	Europäische Raumfahrt-agentur (ESA)	1995	AMI	Radar	1	30	100	35
			ATSR	ms	4	1000	500	35
SPOT-4	Frankreich	1998	VI	ms	4	1150	2200	1
			HRV	ms	4	20	2*60	2 bis 3
				pan	1	10		
Landsat-7	USA	1999	ETM+	ms	6	30	185	16
				pan	1	15		
IKONOS	Space Imaging (USA)	1999	IKONOS	ms	4	4	11	3
				pan	1	1		
Terra (EOS AM1)	USA	1999	ASTER	ms	14	15/30/90	60	16
			MISR	ms	4	275	360	9
			MODIS	ms	36	250/500/1000	2330	2
EROS-A1	ImageSat International (Israel)	2000	Pan	pan	1	1.8	12.5	2
QuickBird	DigitalGlobe (USA)	2001	MS	ms	4	2.4	16.5	1 bis 3.5
			Pan	pan	1	0.6		
Envisat-1	Europäische Raumfahrt-agentur (ESA)	2002	ASAR	Radar	1	150 / 1000	405	3
			MERIS	ms	15	300	1150	3
SPOT-5	Frankreich	2002	HRV	ms	3	10	2*60	2 bis 3
				pan	1	20		
				pan	1	2.5 / 5		
OrbView-3	Orbimage (USA)	2003	OrbView	ms	4	4	8	3
				pan	1	1		
BilSat	Türkei	2003	PAN	pan	1	12.6		
			MS	ms	4	27.6		
IRS-P6 (ResourceSat-1)	Indien	2003	LISS 3	ms	4	23.5	140	24
			LISS 4	ms	3	5.8	23.9 / 70	5
			AWiFS	ms	4	56	740	24
IRS-P5 (Cartosat-1)	Indien	2005	Pan	pan	1	2.5	54	5

Tabelle 2.3: Übersicht zu aktuellen Erdbeobachtungssatelliten

Mission	Betreiber	geplanter Start	Sensor	Typ	Anzahl Kanäle	Auflösung (m)	Szenenbreite (km)	Wiederholung (Tage)
ALOS	Japan	2005	PALSAR	Radar	1	10 / 100	250 - 350	unbekannt
			AVNIR-2	ms	4	10	70	
			PRISM	pan	1	2.5		
ARIES	Australien	2005	ARIES-1	pan	1	10	15	7
				hyper-spektral	105	30		
RADARSAT-2	Kanada	2005	SAR	Radar	1	3 bis 100	10 bis 500	1 bis 3
Cartosat-2	Indien	2005	Pan	pan	1	1	10	5
EROS-B	ImageSat International (Israel)	2006	Pan	pan	1	0.7	7	unbekannt
WorldView	DigitalGlobe (USA)	2006	MS	ms	8	2	16.5	1 bis 3.5
			Pan	pan	1	0.5		
OrbView-5	ORBIMAGE	2007	unbekannt	pan ms	unbekannt	0.41 1.64	unbekannt	1.5
RapidEye	Deutschland	2007	unbekannt	pan ms	5	6.5 6.5	80	1
Pléiades-HR 1	Frankreich	2008	unbekannt	pan	1	0.7	20	5
				ms	4	2.8		
CBERS 3	China/ Brasilien	2008	MUX PAN Infrared System Wide Field Imager	ms	4	20	120	26
				pan	1	5	60	1 bis 26
				IR	4	40/80	120	26
				WFI	4	73	866	5
EROS-C	ImageSat International (Israel)	2009	unbekannt	pan	unbekannt	0.70	11	unbekannt
				ms		2.8		

Tabelle 2.4: Übersicht zukünftiger Erdbeobachtungssatelliten

## 3 Datenmaterial und Untersuchungsgebiete

### 3.1 Datenmaterial

#### 3.1.1 Terrestrische Daten

Die rechtliche Grundlage der deutschen Bundeswaldinventur (*BWI*) ist das Bundeswaldgesetz, in dem die Durchführung einer „auf das gesamte Bundesgebiet bezogenen forstlichen Großrauminventur auf Stichprobenbasis“ (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2. Mai 1975), § 41a) gesetzlich verankert ist. Die erste bundesweite Datenerhebung im Rahmen der *BWI* I fand von 1986 bis 1988 in den alten Bundesländern statt. Auf dem Gebiet der neuen Bundesländer gab es in diesem Zeitraum keine vergleichbare Großrauminventur. Deshalb ist die *BWI* II, deren Daten von 2000 bis 2002 aufgenommen wurden, in den neuen Bundesländern eine Erstinventur.

#### Inventurverfahren

Die *BWI* wird nach einem terrestrischen Stichprobenverfahren mit gleichmäßig systematischer Stichprobenverteilung über das gesamte Gebiet der Bundesrepublik Deutschland durchgeführt. Der Anordnung der Stichproben liegt ein 4 km x 4 km-Gitternetz (Grundnetz) (1) zugrunde, das in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem eingepasst ist. Auf Wunsch der Bundesländer wurde die Stichprobendichte regional verdoppelt, was einem 2,83 km x 2,83 km-Verband (2) entspricht oder vervierfacht, so dass ein 2 km x 2 km-Netz (4) entsteht (siehe Abb. 3.1). Die doppelte Stichprobendichte kommt in Teilen Bayerns, Niedersachsens, Thüringens und im gesamten Bundesland Sachsen und die vierfache in den Ländern Baden-Württemberg, Mecklenburg-Vorpommern, Schleswig-Holstein und Rheinland-Pfalz zur Anwendung.

Das Stichprobendesign der *BWI* entspricht dem einer einstufigen Clusterstichprobe. Die Stichprobeneinheit ist der Trakt, der eine quadratische Fläche mit einer Seitenlänge von 150 m umschließt. Die Seiten des Traktes, die in Nord-Süd bzw. Ost-West-Richtung orientiert sind, bilden die Traktlinien. Die Traktkoordinaten geben die Lage der südwestlichen Traktecke an. Über Waldverteilungskarten oder Luftbilder wird dem Trakt der aktuelle Status zugewiesen. Sobald mindestens eine der vier Traktecken im Wald liegt, handelt es sich um einen Waldtrakt, dessen Daten erhoben werden. Dies umfasst Winkelzählproben mit verschiedenen Zählfaktoren und die Aufnahme von Probekreisen mit unterschiedlichen Radien an der Traktecke (siehe Abb. 3.2). Schnittpunkte mit Traktlinien werden zur Wegeinventur erfasst. Trakte, die nach der Karten- bzw. Luftbilddarstellung zweifelsfrei außerhalb des Waldes liegen, sind Nichtwaldtrakte und werden im Gelände nicht aufgesucht.

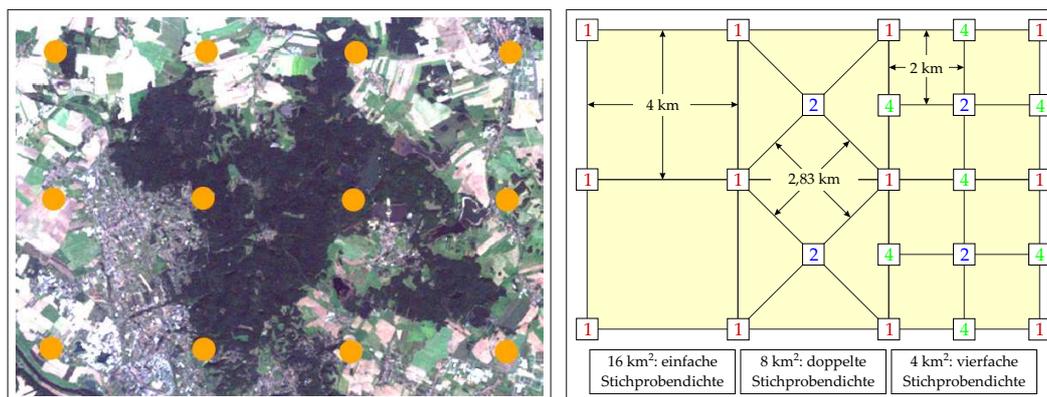


Abbildung 3.1: Systematische Stichprobenverteilung und Stichprobennetz der BWI

An den Bäumen, die mit der Winkelzählprobe mit Zählfaktor 4 als Probebäume ausgewählt wurden, werden die meisten Inventurdaten aufgenommen. Dazu zählen unter anderem Baumart, Bestandesschicht, Brusthöhendurchmesser, Baumklasse, Baumalter, Baumhöhe, oberer Durchmesser, Höhenkennziffer, Stammschäden und Astung. Die Winkelzählproben mit Zählfaktor 1 oder 2 dienen der Erfassung der Baumartenanteile am Probepunkt, woraus zum Beispiel Bestockungstypen und Mischungsverhältnisse abgeleitet werden. Probekreise mit fester Größe werden zur Aufnahme von Totholz, der Beschreibung von Strauchschicht, Bodenvegetation und Waldrändern sowie zur Erfassung von Merkmalen der Verjüngung etc. angelegt.

Somit wurden insgesamt circa 150 Merkmale erhoben. Im Gegensatz zur BWI I deckt die BWI II ein größeres Informationsspektrum mit stärkerem Gewicht auf ökologischen Attributen ab. Während die BWI I im Wesentlichen auf die Erhebung von Bestandesmerkmalen ausgerichtet war, hat die zweite Großrauminventur auch über Bestandesgrenzen hinweg Daten erfasst. Obwohl zwischen beiden Inventuren Unterschiede in den Aufnahmeverfahren bestehen, sind die Zielgrößen, wie beispielsweise Waldfläche und Vorrat direkt miteinander vergleichbar, da die Algorithmen zur Hochrechnung der Daten adaptiert wurden.

### 3.1.2 Satellitendaten

Die einzelnen Untersuchungsgebiete (siehe Kapitel 3.2) werden von Landsat 5- und Landsat 7-Daten abgedeckt, die uns freundlicherweise vom Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Oberpfaffenhofen zur Verfügung gestellt wurden. Für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebietes Pfälzerwald sind QuickBird-Daten von der Firma Eurimage (Italien) bezogen wurden. In Abbildung 3.3 sind Aufnahmen der verschiedenen Sensoren für einen identischen Ausschnitt des Pfälzerwaldes gegenübergestellt.

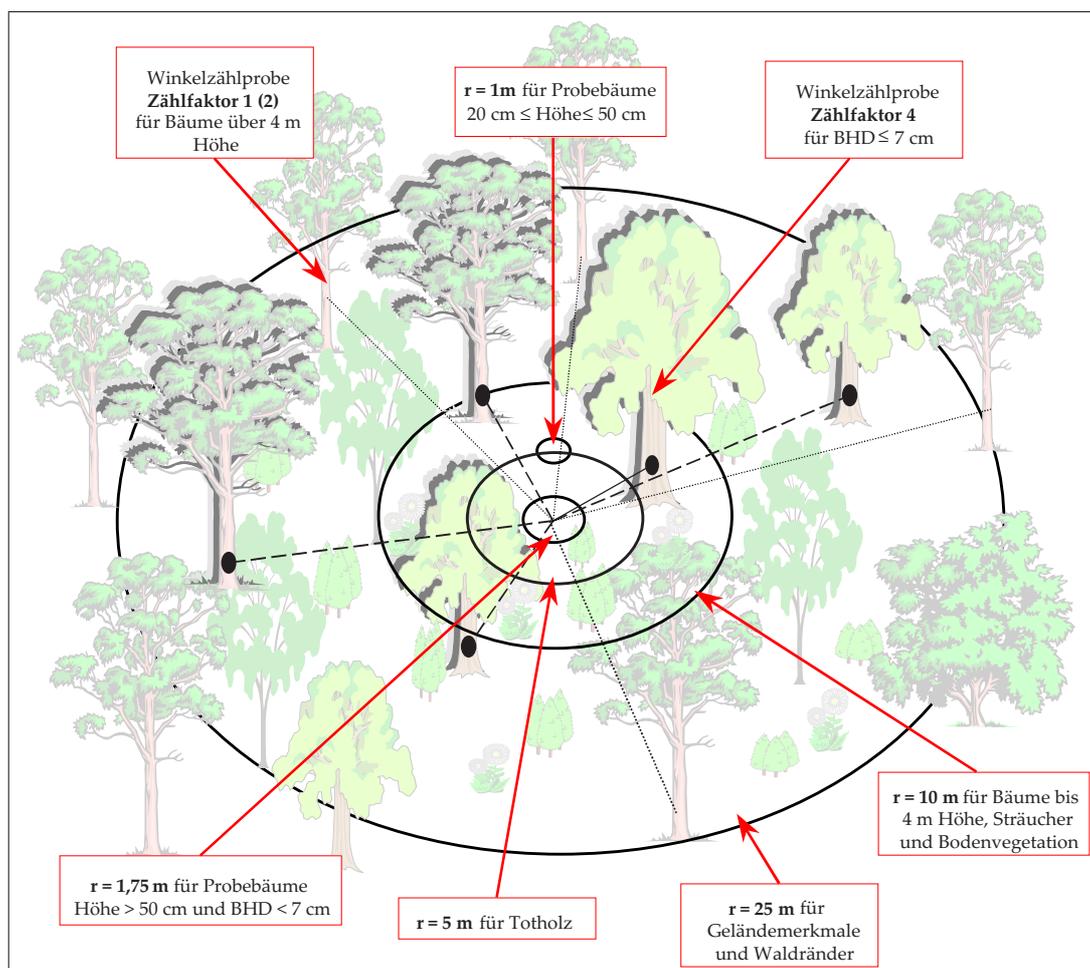
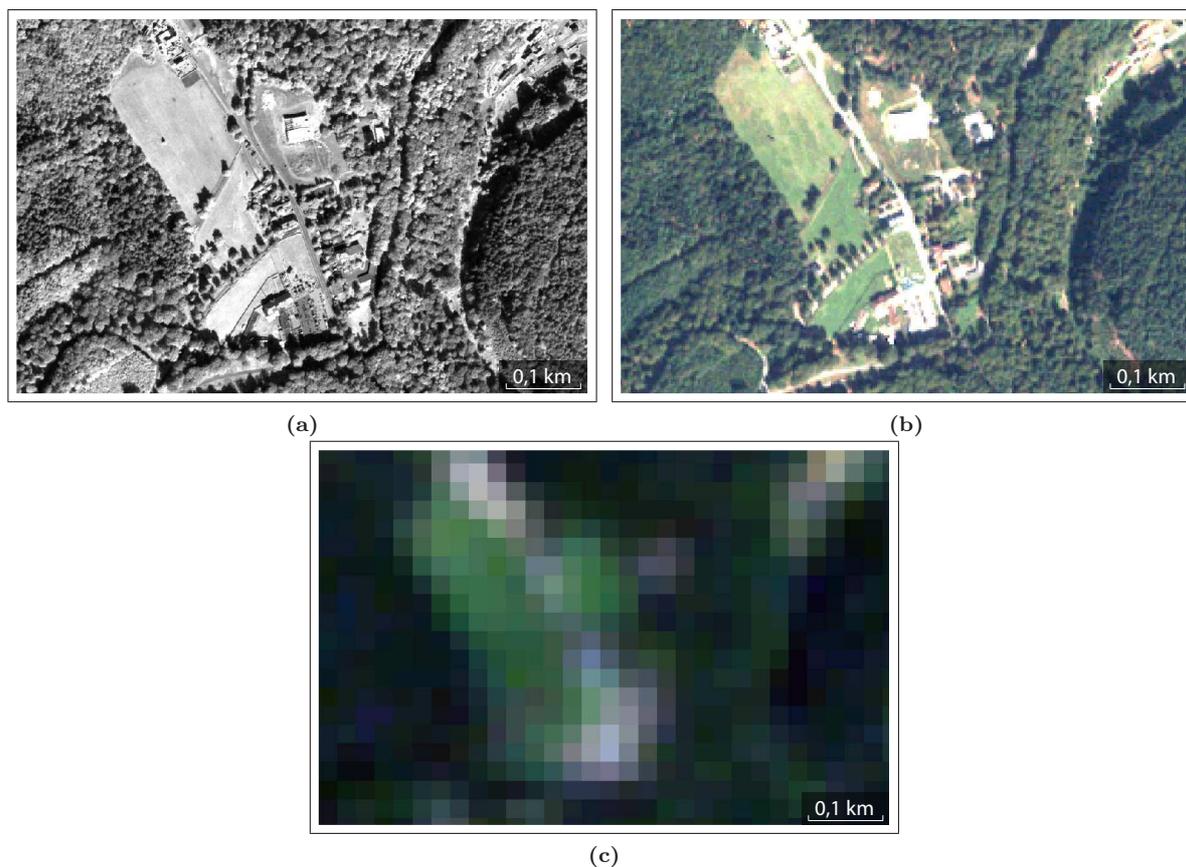


Abbildung 3.2: Datenaufnahme an der Traktecke

### QuickBird-Daten

Im Rahmen des Projektes „WEI-BWI“ wurden QuickBird-Daten erworben, die 581 km<sup>2</sup> des Untersuchungsgebietes Pfälzerwald abdecken. Eine Übersicht zu diesen Daten ist in Tabelle 3.1 aufgelistet.

Die Szenen wurden von der Firma Eurimage systemkorrigiert und mit der cubic convolution-Methode resampled, da aufgrund von Prozessierungsproblemen von einem Resampling mit dem nearest neighbor-Verfahren abgeraten wurde. Laut Eurimage (EURIMAGE (2004)) ist der blockweise Versatz von Bildinformationen eine negative Charakteristik des nearest neighbor-Resamplings. Weiterhin können resamplingbedingte radiometrische Artefakte in den multispektralen Informationen in Form von „Farbexplosionen“ einzelner Pixel auftreten. Die durchschnittliche Lagegenauigkeit beträgt 23 m, wobei topographische und off-nadir Abweichungen darin nicht enthalten sind (DIGITAL GLOBE (2004)).



**Abbildung 3.3:** Sensoraufnahmen für einen identischen Ausschnitt des Pfälzerwaldes von QuickBird (pan) (a), QuickBird (ms) (b) und Landsat 7 (ms) (c)

QuickBird		
Szenen-ID	1	2
Kanäle	multispektral + panchromatisch	multispektral + panchromatisch
bits per pixel	11	11
Pixelgröße multispektral	2,8 m	2,8 m
Pixelgröße panchromatisch	0,7 m	0,7 m
Aufnahmedatum	05.09.2004	05.09.2004
Aufnahmezeit	10:34:22	10:34:25
Sonnenhöhe (Bildmitte)	46,0°	46,1°
Sonnenazimuth (Bildmitte)	160,9°	160,9°
offNadirViewAngle	11,4	12,6
Wolkenbedeckung	0%	0%
Resamplingmethode	cubic convolution	cubic convolution
Prozessierungslevel	Standard	Standard

**Tabelle 3.1:** Szeneninformationen der QuickBird-Daten

Die QuickBird-Szenen sind vollständig wolkenfrei, lediglich minimale Dunstbeeinflussungen

sind festzustellen. Im Satellitenbild sind in bebauten Gebieten Artefakte in Form weißer kegelförmiger Flächen zu beobachten. Diese entstehen durch stark reflektierende Materialien, wie Metall oder Glas, die eine Überladung in den lichtempfindlichen Halbleiterdetektoren (CCD's) des Sensors erzeugen. In der Bildmitte überfliegt ein Flugzeug den Pfälzerwald. Für weitere Auswertungen der Daten war eine Transformation vom WGS84-Ellipsoid auf den Bessel-Ellipsoid und vom Datum WGS84 in das Potsdam-Datum erforderlich.

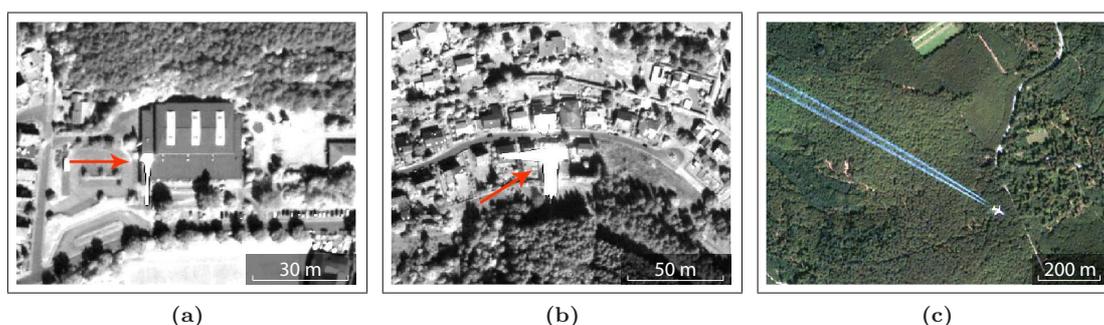


Abbildung 3.4: Artefakte in der QuickBird-Szene: Überladungseffekte der Detektoren (a) und (b), Flugzeugüberflug (c)

## Landsat-Daten

Durch die Landsat-Szenen ist eine dem Inventurzeitpunkt der terrestrischen Aufnahmen der ersten und zweiten Bundeswaldinventur entsprechende Datengrundlage für den Bereich der Fernerkundung gegeben. Die Aufnahmezeiträume der Satellitendaten stimmen in etwa mit denen der terrestrischen Datenerhebungen überein, so dass eine Vergleichbarkeit der Daten gewährleistet ist. Die Landsat 5-Szenen wurden in einem Zeitraum zwischen 1989 und 1992 und die Landsat 7-Szenen zwischen 1999 und 2001 aufgenommen. Die für die Auswertungen relevanten Datensätze sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Als Referenzsystem liegt den Satellitendaten das Gauß-Krüger-Koordinatensystem basierend auf dem Bessel-Ellipsoiden, Datum Potsdam, zugrunde. Die Auflösung der multispektralen Daten beträgt 25 m und der panchromatischen 12,5 m und resultiert aus Datenaufbereitungsschritten der DLR.

Die radiometrische Qualität der Landsat-Szenen ist unterschiedlich. Zwei Szenen, die Landsat 7-Szene 196024 (Nordszene UG Westliches Mittelgebirge) und die Landsat 7-Szene 192027 (Ostszene UG Alpen), werden von einem geringen Wolkenanteil überdeckt. Wenn diese Regionen nicht im Überlappungsbereich der jeweils anderen Landsat-Szene liegen, wurden die Wolken und deren Schatten maskiert und als eigene Objektklasse ausgewiesen.

Die Landsat 7-Daten des UG Sachsen weisen einen Spaltenversatz auf, der in beiden Szenen unregelmäßig verteilt zu finden ist. Die Spaltenbreite beträgt jeweils ca. 600 m und der Versatz ca. 1 - 2 Pixel. Offensichtlich handelt es sich um Kacheln mit einer Kantenlänge von 600 m, die entweder eine Kachel oder mehrere Kacheln groß sind und sowohl horizontal als auch vertikal auftreten. Auffällig ist dieser Versatz nur an markanten Objekten, wie breiten Strassen oder

Untersuchungsgebiet	Sensor	Szene	Aufnahmedatum	Projektion
Westliches Mittelgebirge	Landsat 5-TM	196024	25.05.1989	GK 3
	Landsat 5-TM	196025	05.08.1992	GK 3
	Landsat 7-ETM+	196024	15.05.2000	GK 3
	Landsat 7-ETM+	196025	05.07.2001	GK 3
Nordostdeutschland	Landsat 7-ETM+	193023	14.08.2000	GK 4
	Landsat 7-ETM+	194023	04.09.1999	GK 4
Sachsen	Landsat 7-ETM+	192024	24.09.2000	GK 5
	Landsat 7-ETM+	192025	24.09.2000	GK 5
Alpen	Landsat 5-TM	192027	07.08.1991	GK 4
	Landsat 5-TM	193027	30.08.1991	GK 4
	Landsat 7-ETM+	192027	26.08.2004	GK 4
	Landsat 7-ETM+	193027	13.09.1999	GK 4
Pfälzerwald	Landsat 5-TM	195026	07.09.1989	GK 3
	Landsat 7-ETM+	195026	15.08.2001	GK 3

Tabelle 3.2: Übersicht zu den verwendeten Landsat-Daten

Flüssen (siehe Abb. 3.5). Eine mögliche Ursache ist ein Prozessierungsfehler, der bei der Reprojektion der Daten von Gauß-Krüger 4 auf den 5er-Streifen entstanden ist.

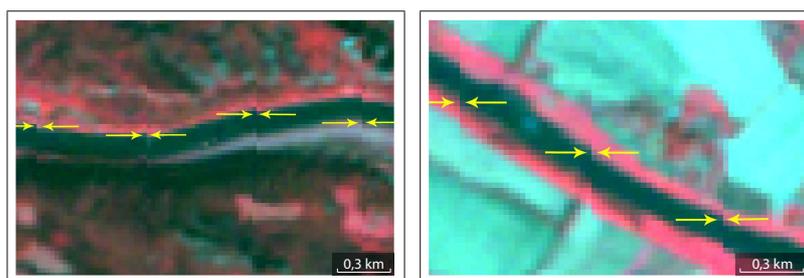


Abbildung 3.5: Spaltenversatz in den Landsat 7-Szenen des UG Sachsen

Andere auffällige radiometrische Beeinflussungen sind nicht festzustellen.

### 3.1.3 Digitale Zusatzdaten

Das Ziel der Arbeit ist die Erfassung von Waldflächen nach BWI-Walddefinition mittels eines kombinierten Verfahrens aus satellitengestützter Erdbeobachtung und terrestrischen Daten für ganz Deutschland. Allerdings ist der Erwerb von Zusatzdaten mit zusätzlichen Kosten verbunden, so dass innerhalb des Finanzrahmens der Bundeswaldinventur lediglich kostenfrei verfügbare Datenquellen zum Einsatz kommen können. Dies ist beispielsweise durch die Kooperation mit dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) möglich. Weitere digitale Zusatzdaten, wie Orthofotos oder digitale Forsteinrichtungsdaten der Bundesländer, stehen nicht kostenfrei für die gesamte Bundesrepublik zur Verfügung und wurden deshalb nur für die Testphase und Entwicklung des Verfahrens verwendet. Die digitalen Zusatzdaten

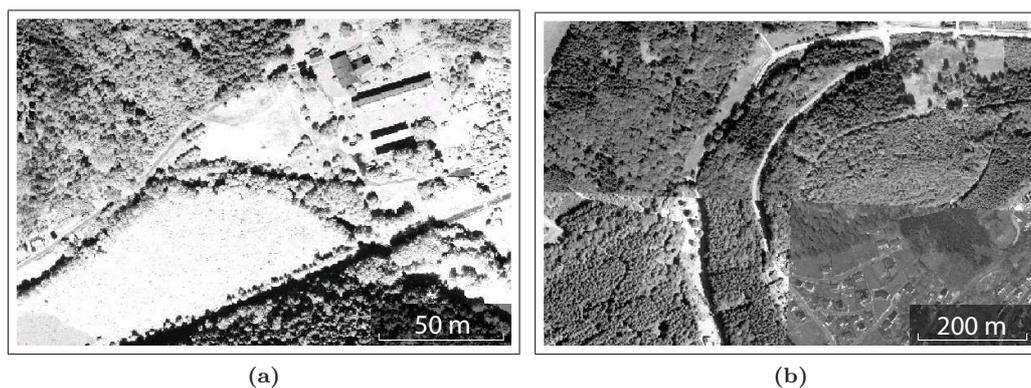
werden unter anderem für geometrische und radiometrische Korrekturen, zur Waldmaskenerstellung, Verifizierung, Darstellung von Ergebnissen, zum Abgleich von Lageabweichungen und Aktualitätsdefiziten eingesetzt.

### Orthofotos

Im Gegensatz zu Luftbildern haben Orthofotos durch eine genäherte Parallelprojektion unter Berücksichtigung von genauen Reliefeigenschaften der Erdoberfläche einen einheitlichen Maßstab und Raumbezug über die gesamte Bildfläche. Deshalb dienen diese Daten als zusätzliches Material für Korrekturen der Satellitendaten, der visuellen Interpretation und der Verifizierung der Waldmasken.

Schwarz-Weiß Orthofotos wurden von den Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Sachsen zur Verfügung gestellt. Die Bodenauflösung der Daten von Sachsen beträgt 0,8 m und die Befliegungen fanden in einem Zeitraum zwischen 1996 - 2001 statt. Die einzelnen Kacheln wurden forstamtsweise zu Mosaiken zusammengesetzt. Die Fotos sind auf die Gauß-Krüger Streifen 4 bzw. 5 georeferenziert. Die Daten von Rheinland-Pfalz wurden in den Jahren 1998 und 1999 mit einer Auflösung von 1 m aufgenommen, auf den Gauß-Krüger Streifen 2 georeferenziert und für das gesamte Untersuchungsgebiet zusammengefügt. Zwischen 1996 und 1999 wurden in Nordrhein-Westfalen Orthobilddaten mit einer Auflösung von 0,3 m erhoben, die für das gesamte Gebiet mosaikiert und deren Auflösung auf ca. 1 m reduziert wurde. Diese Orthofotos liegen in einer Georeferenzierung der Gauß-Krüger Streifen 4 bzw. 5 vor.

Die Orthofotos sind partiell von schlechter Qualität. Nach der Mosaikierung der einzelnen Kacheln wurden deutliche Grauwertdifferenzen sichtbar, die besonders an den Schnittkanten der Kacheln zu erkennen waren. Aufnahmebedingte Über- bzw. Unterbelichtung verschiedener Fotos ließen teilweise Aussagen zu den entsprechenden Regionen nicht zu (siehe Abb. 3.6).



**Abbildung 3.6:** Qualitätsmängel der Orthofotos: (a) Überbelichtung, (b) starke Grauwertdifferenzen benachbarter Kacheln

### **Digitale Topographische Karte DTK25**

Vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (*BKG*) werden digitale Topographische Karten angeboten, wobei der größte verfügbare Maßstab 1 : 25.000 ist. Diese Daten wurden für alle Untersuchungsgebiete in Form von blattschnittfreien Kacheln einer Größe von 10 km x 10 km in Gauß-Krüger-Abbildung des 3. Meridianstreifens, Bessel-Ellipsoid, Potsdam Datum (Zentralpunkt Rauenberg), geodert. Zur Differenzierung der verschiedenen Informationen liegen die Daten in den vier Ebenen Grundriss (u.a. Ortsbezeichnungen/Kartennamen, Siedlungen, Verkehrswege), Gewässer (Gewässerbezeichnung, Gewässerkontur, Gewässerfläche), Höhenlinien und Vegetation vor. Die Aktualität der Daten ist abhängig vom Einzelblatt und reicht von 1989 bis 2004. Der mittlere Lagefehler beträgt ca.  $\pm 10$  m bis  $\pm 20$  m.

Die LZW<sup>1</sup>-komprimierten Einzelkacheln wurden zu einem einheitlichen Mosaik je Ebene zusammengesetzt. Die Mosaikierung der TK kompletter Testgebiete war in der Originalauflösung aufgrund der großen Datenmengen nicht möglich. Daher wurde die Auflösung von 1,25 m auf 5 m reduziert, so dass alle notwendigen Informationen erhalten werden konnten. Sowohl die möglichen Lageabweichungen als auch die Aktualitätsdefizite müssen bei der Verwendung dieser Daten berücksichtigt werden, die zur Waldmaskengenerierung und für die Darstellung von Ergebnissen eingesetzt wurden.

### **Digitales Landschaftsmodell (Basis-DLM)**

Das Basis-DLM, welches vom BKG zur Verfügung gestellt wurde, beschreibt die topographischen Objekte der Landschaft im Vektorformat auf Grundlage des Objektartenkatalogs des Amtlichen Topographisch-Kartographischen Informationssystems (*ATKIS*). Der Informationsumfang des Basis-DLM orientiert sich am Inhalt der Topographischen Karte 1 : 25.000, weist jedoch eine höhere Lagegenauigkeit ( $\pm 3$  m bis  $\pm 15$  m) für die wichtigsten punkt- und linienförmigen Objekte auf. Der Bearbeitungsstand des DLM erstreckt sich in Abhängigkeit vom Gebiet über einen Zeitraum von 1993 bis 2000. Je nach Verfügbarkeit wurden die Daten der Untersuchungsgebiete in der Gauß-Krüger-Projektion der entsprechenden Meridiane, Bessel-Ellipsoid, Potsdam Datum (Zentralpunkt Rauenberg), entweder im Kompaktformat oder nach Ebenen strukturiert bereitgestellt.

Durch die Attribute der Objektarten bzw. der Ebenen konnten die benötigten Daten gezielt selektiert werden, so dass keine aufwendigen Datenaufbereitungsarbeiten erforderlich waren. Die topographischen Informationen des digitalen Landschaftsmodells wurden u.a. in die Aufbereitungsschritte der Satellitendaten, in die Waldmaskenerstellung und Verifizierung eingebunden.

---

<sup>1</sup>ein von 1985 bis 2004 patentgeschützter Algorithmus zur verlustfreien Datenkompression von Lempel, Ziv und Welch (LZW), der u. a. von den Dateiformaten GIF, TIFF, PDF und PostScript Level 2 verwendet wird

### **Digitales Geländemodell (DGM50 M745)**

Das Digitale Geländemodell 50 M745, welches auf digitalisierte Höhenfolien der TK50 M745 des Amtes für militärisches Geowesen zurückzuführen ist, beschreibt die Geländeformen der Erdoberfläche durch eine in einem regelmäßigen Gitter angeordnete, in Lage und Höhe georeferenzierte Punktmenge. Die Gitterweite beträgt in Gauß-Krüger-Abbildung ungefähr 25 m bei einer Genauigkeit der Höhe von  $\pm 26$  m und der Lage von  $\pm 20$  m. Die Daten ausgewählter Untersuchungsgebiete wurden vom BKG im ASCII-Format bereitgestellt.

Die Erstellung des Höhenmodells für Untersuchungsgebietgröße war kompliziert, da aus dem engmaschigen Gitter eine hohe Anzahl von Punktdaten resultiert. Die Konvertierung dieser Datenmengen zu Geländeoberflächen überfordert die Kapazität gängiger Systeme, so dass eine Unterteilung in Einzelkacheln erfolgte, für die jeweils unabhängig Höhenmodelle berechnet wurden. Anschließend wurden die einzelnen „Reliefkacheln“ zu einem zusammenhängenden Höhenmodell verbunden.

Das digitale Geländemodell wurde für die Topographische Normalisierung der Fernerkundungsdaten verwendet.

### **3.2 Untersuchungsgebiete**

In Hinblick auf die Weiterentwicklung einer Großrauminventur wurden fünf Untersuchungsgebiete nach unterschiedlichen Kriterien ausgewählt, wobei vielfältige Aspekte und Fragestellungen zu berücksichtigen waren:

- Bestockung mit verschiedenen Baumarten, möglichst Abdeckung der Hauptbaumarten Deutschlands
- unterschiedliche Altersklassen, Mischungsformen, Bestockungs- und Überschirmungsgrad
- Unterschiede der räumlichen Struktur der Wälder (Homogenität/Heterogenität der Wald- bzw. Nichtwaldgebiete) sowie der Waldverteilung über der Fläche (zusammenhängende und kleinräumige, fragmentierte Waldgebiete)
- Berücksichtigung unterschiedlicher geologischer, pedologischer und kleinklimatischer Bedingungen
- Abdeckung verschiedener Reliefformen
- Integration unterschiedlicher Stichprobendichten der terrestrischen Aufnahme (BWI)
- Berücksichtigung der neuen Bundesländer (Erstinventur) und der alten Bundesländer (Wiederholungsinventur)
- geeignete Flächengröße des Untersuchungsgebietes, um repräsentative und statistisch gesicherte Ergebnisse zu liefern

Die Beschreibungen und Angaben zu den einzelnen Untersuchungsgebieten und deren Lage sind in Abbildung 3.7 und Tabelle 3.3 dargestellt. Sie sind an die Beschreibung der „Waldökologischen Naturräume Deutschlands“ (GAUER und ALDINGER (2005)) angelehnt.

Untersuchungsgebiet	Bezeichnung und Gebietsgröße	Ecke	Gauß-Krüger-Koordinaten		
			Mittelmeridian	Rechtswert	Hochwert
1	Westliches Mittelgebirge 8.000 km <sup>2</sup>	links oben	9°	3.390.000	5.710.000
		rechts unten	9°	3.470.000	5.610.000
2	Nordostdeutschland 10.000 km <sup>2</sup>	links oben	12°	4.510.000	5.930.000
		rechts unten	12°	4.630.000	5.850.000
3	Sachsen 5.100 km <sup>2</sup>	links oben	15°	5.380.000	5.690.000
		rechts unten	15°	5.460.000	5.600.000
4	Alpen 4.150 km <sup>2</sup>	links oben	12°	4.440.000	5.300.000
		rechts unten	12°	4.590.000	5.250.000
5	Pfälzerwald 3.600 km <sup>2</sup>	links oben	9°	3.390.000	5.500.000
		rechts unten	9°	3.445.000	5.430.000
5 QuickBird	Pfälzerwald 581 km <sup>2</sup>	links oben	9°	3.405.305	5.483.600
		rechts unten	9°	3.423.510	5.449.918

Tabelle 3.3: Geographische Informationen zu den Untersuchungsgebieten

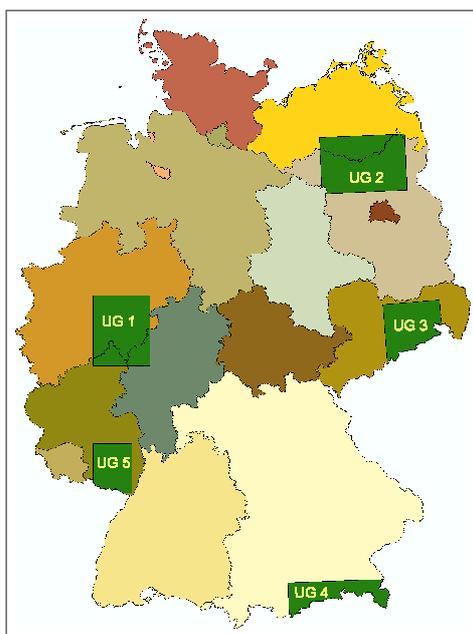


Abbildung 3.7: Lage der Untersuchungsgebiete

### 3.2.1 Untersuchungsgebiet Westliches Mittelgebirge

Dieses Untersuchungsgebiet liegt in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz und Hessen. Die BWI-Daten wurden hier als Wiederholungsinventur erhoben. In Rheinland-Pfalz wurde das Stichprobennetz auf 2 km x 2 km verdichtet. Die Mittelgebirgslandschaft umfasst den Arnsberger Wald, das Sauerland, das Rothaargebirge und einen Teil des Westerwaldes und ist durch Bergrücken, Einzelberge und Täler stark gegliedert. Der überwiegende Teil des Gebietes liegt in Höhen zwischen 300 und 600 m über NN, wobei das Höhenprofil bereits bei 100 m über NN beginnt und bis zu 840 m über NN (u.a. Langenberg, Kahler Asten) reicht. Die heutige potentielle natürliche Vegetation wird größtenteils von Buchenwäldern verschiedener Ausprägung gebildet, u.a. Hainsimsen-, Waldschwingel-, Rasenschmielen-Buchenwald. Ursprünglich fehlend ist die Fichte dank ihrer hohen Konkurrenzkraft Teil der heutigen potentiellen natürlichen Vegetation geworden. Ab der montanen Höhenstufe sind Fichten-Buchenwälder anzutreffen. In Tallagen sind Stieleichen-Hainbuchenwälder, Weichholzaunen und Erlen-Eschenwälder zu finden. Derzeit ist der Großteil der Waldfläche mit Nadelholz bestockt.

### 3.2.2 Untersuchungsgebiet Nordostdeutschland

Die nordostdeutsche Tieflandregion ist bis auf einzelne Höhen um 100 m überwiegend planar, höchste Erhebung ist der Feldberg mit 145 m. Das Gebiet befindet sich in den Bundesländern Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg, wobei die terrestrischen Aufnahmen erstmalig durchgeführt wurden, in Mecklenburg-Vorpommern mit einem 2 km x 2 km verdichteten Stichprobenraster. Ein auffälliges Merkmal dieser Landschaft sind die zahllosen Seen, beispielsweise der Feldberger Seenlandschaft oder des Nationalparks Müritz. Ebenso ist das Biosphärenreservat Schorfheide ein Teil des Untersuchungsgebietes. Waldmeister- und Perlgras-Buchenwälder auf kräftigen und mittleren Sand-Standorten der Grundmoränen, Flattergras- und Hainrispengras-Buchenwälder auf ärmeren Standorten der Sander und inselartige Vorkommen von Kiefernwäldern in den großen Dünenfelder der Sandergebiete (Kien-Schorfheide) bilden die potentielle natürliche Vegetation. Aufgrund der günstigen Standortverhältnisse und klimatischen Bedingungen ist in diesem Untersuchungsraum das größte, geschlossene Buchengebiet Brandenburgs zu finden. Die eiszeitlich geprägte Landschaft wird vor allem landwirtschaftlich genutzt, so dass neben größeren, geschlossenen Waldflächen auch kleinräumige, inselartige Waldvorkommen zu finden sind, wobei es sich vorwiegend um nadelholzreiche Bestockungen handelt.

### 3.2.3 Untersuchungsgebiet Sachsen

Das in Sachsen untersuchte Gebiet umfasst die Dresdner Elbtalzone, das Elbsandsteingebirge, Teile des Westlausitzer Hügel- und Berglandes und des Erzgebirges. Im Süden wird es von der Tschechischen Republik begrenzt und im Norden reicht es bis an die Ausdehnungsgrenze des nordostdeutschen Tieflandes, so dass Höhen zwischen 100 m bis 900 m (Kahleberg

905 m) erreicht werden. Die Daten der BWI wurden hier als Erstaufnahme mit einem Stichprobennetz von 2,83 km x 2,83 km erhoben. Die natürliche Waldgesellschaft der Elbtalweitung ist der Waldlabkraut-Hainbuchen-Eichenwald mit Linde, auf den armen Sandterrassen der Kiefern-Eichenwald. Die anschließenden Gebiete der Elbtalzone und der Westlausitzer Platte sind von Natur aus mit Traubeneiche, Hainbuche, Linde und Buche bestockt, auf ärmeren Sanden auch mit Kiefer und Birke. Die Ausläufer der nordostdeutschen Tieflandregion sind mit Buchen-Traubeneichen-Wäldern ausgestattet. Die Höhenstufen des Erzgebirges prägen die Vegetationsausstattung des Mittelgebirges stark. In unteren Berglagen herrscht ein Hainsimsen-Eichen-Buchenwald mit Fichte vor, wobei die montanen mittleren Berglagen mit Hainsimsen-(Tannen- Fichten-)Buchenwald bestockt sind. In den hochmontanen Berglagen ist der Wollreitgras-Fichten-Buchenwald und in den höchsten Kammlagen der Wollreitgras-Fichtenwald als natürliche Vegetation anzusehen. Heute werden die Wälder zum überwiegenden Teil von Fichten-Reinbeständen gebildet.

### 3.2.4 Untersuchungsgebiet Alpen

Das Untersuchungsgebiet Alpen erstreckt sich vom Alpenvorland bis zur österreichischen Grenze, so dass das Höhenprofil von 300 m bis 2800 m (Karwendelmassiv) reicht. Für diese Region Bayerns wurde eine Wiederholungsinventur im 4 km x 4 km-Grundnetz der BWI durchgeführt. Charakteristisches Merkmal des Alpenvorlandes sind die oberbayrischen Seen und zahlreiche Alpenflüsse, die durch die Endmoränenwälle strömen. Daran schließt sich das junge, alpine Faltengebirge an, in dem von der submontanen bis zur alpinen alle Höhenstufen vorkommen. Flächenmäßig bedeutsam sind Buchen-Tannenwälder. Die alpine Region beherbergt als natürliche Vegetation den Bergmischwald mit verschiedenen Anteilen von Buche, Tanne, Fichte und Bergahorn, wobei die Wuchskraft und Anteil der Buche mit zunehmender Höhe abnimmt. Vorerorts kann die Fichte als eingebürgert gelten, jedoch ist die heutige Waldzusammensetzung wesentlich fichtenreicher als im Naturzustand. Gipfel und Grate werden weithin von Latschen-Krummholz eingenommen. Durch die naturräumliche Ausstattung ist die Vielfalt an Waldgesellschaften auf Sonderstandorten besonders hoch. In abflusslosem Gelände mit stagnierenden Wässern sind Schwarzerlen-Bruch und -Sumpfwälder auf Niedermooren typisch, aber auch Hochmoore (Filze) und Übergangsmoore sind zu finden. Kleinere Flächen sind mit föhnbedingten Trocken-Kiefernwälder (Schneeheide-Kiefernwälder) und Dauergesellschaften auf Schutt- und Felshängen bedeckt. Aufgrund der Waldentwicklung ist der Anteil an Laubbäumen stark zurückgegangen und Nadelbäume, insbesondere die Fichte, sind die vorherrschende Baumart.

### 3.2.5 Untersuchungsgebiet Pfälzerwald

Der Pfälzerwald liegt vollständig in Rheinland-Pfalz und wurde im Rahmen der BWI zum zweiten Mal mit der vierfachen Stichprobendichte (2 km x 2 km) und in den Kernzonen des Biosphärenreservates Pfälzerwald zusätzlich mit einem 500 m x 500 m Stichprobennetz inventarisiert. Das „bunte Sandsteingebirge der Pfalz“ ist das nordwestliche Randgebirge des Oberrheingrabens im Anschluss an die Vogesen in Frankreich, die zusammen das grenzübergreifende Biosphärenreservat Pfälzerwald-Nordvogesen bilden. Diese Schichtstufenlandschaft ist

stark reliefiert, im Osten ist der Gebirgsrand durch die Rheingrabenbildung besonders stark angehoben und durch Täler zerschnitten. Während sich die Tallagen zwischen 150-220 m erstrecken, zählen der Hochberg mit 634 m und der Donnersberg mit 687 m zu den höchsten Erhebungen. Der südliche Teil des Pfälzerwaldes bietet ein vollkommen anderes Relief, dass durch breite Täler, Kegelberge und markante Bergkämmen gezeichnet ist. Im Westen geht er fließend in das Saarländisch-Pfälzische Muschelkalkgebiet über. Nördlich des Pfälzerwaldes ist die Westrische Moorniederung und ein Teil der Hügellandschaft des Saar-Nahe-Berglandes zu finden. Im Osten schließt sich das oberrheinische Tiefland als Vorbergzone des Pfälzerwaldes an. Das Untersuchungsgebiet liegt im zentralen Verbreitungsgebiet der Rotbuche, die aufgrund der Standortbedingungen zum Spektrum der sauren Moder-Buchenwälder in der eichenreichen, kollinen Ausprägung des Hainsimsen-Buchenwaldes gehört. Eiche und Kiefer sind als Zwischenbaumarten und auf trockenen Standorten in Waldgesellschaften der Preiselbeer-Eichenwälder und Weißmoos-Kiefernwälder zu erwarten.

## 4 Aufbereitung der Satellitendaten

Die Auswertung der Satellitendaten bedarf einer präzisen Datenvorverarbeitung, die sich aus radiometrischen und geometrischen Korrekturen und Verbesserungen zusammensetzt. Radiometrische Korrekturen sind aufgrund von atmosphärischen Einflüssen, Sensordefekten oder fehlerhaften Datenübertragungen erforderlich. Die geometrische Korrektur umfasst Verfahren zur Richtigstellung von Lage- und Maßstabsfehlern der Satellitenszenen und zur Anpassung von Daten an Referenzsysteme. Meist sind Satellitendaten vom Datenlieferanten bereits vorkorrigiert, so dass systembedingte Fehler, die beispielsweise durch die Flugbahn des Sensors verursacht werden, weitgehend kompensiert sind.

### 4.1 Geometrische Korrektur

#### 4.1.1 Georeferenzierung der QuickBird-Daten

Aufgrund der hohen Auflösung der Satellitendaten stellt die Georeferenzierung insbesondere an die Referenzdaten große Anforderungen. Als Referenz wurden Orthofotos mit einer Auflösung von 1 m eingesetzt, wobei die Wahl der Passpunkte durch die teilweise starken Beleuchtungseffekte der Fotos erschwert war. Auch in großen Waldgebieten ergaben sich Schwierigkeiten, entsprechend markante Geländemerkmale zu finden. Letztendlich standen 28 Passpunkte zur Verfügung, deren Root Mean Square Error (*RMSE*) mit 0,98 im akzeptablen Subpixelbereich einzuordnen ist. Der *RMSE* ist ein Maß für die Übereinstimmung spezifisch berechneter Lösungen und Originaldaten und zeigt somit die Differenz nach Berechnung der Transformation zwischen der gewünschten und der aktuellen Lage des Punktes. Die Satellitendaten wurden mit einem Polynom dritten Grades transformiert und durch ein Nearest Neighbor (*NN*)-Verfahren resampled. Das *NN*-Verfahren wurde gewählt, weil dabei die radiometrischen Originalwerte der Ausgangsszene weitgehend unverändert bleiben.

Die mittlere Lagegenauigkeit von 0,98 Pixeln ist ein gutes Ergebnis für die Entzerrung der QuickBird-Daten, insbesondere im Vergleich zur geometrischen Genauigkeit der Landsat-Daten. Ein Lagevergleich mit markanten Punkten im Orthofoto und dem ATKIS-Strassenlayer ergab in verschiedenen Bereichen, vor allem dort, wo eine geringe Passpunktabdeckung möglich war, Lagedifferenzen von  $\pm 10$  m. Eine weitere Verbesserung dieser Abweichungen ist aufgrund des vorhandenen Datenmaterials nicht möglich.

### 4.1.2 Georeferenzierung der Landsat-Daten

Die Orthorektifizierung der von der DLR zu Verfügung gestellten Landsat 7-Daten erfolgte nach der „precision processing method“ am Joint Research Center in Ispra (Italien). Für die Bestimmung der Passpunkte wurden Topographische Karten im Maßstab 1 : 25.000 verwendet. Zur Korrektur von reliefbedingten Lagefehlern kam ein digitales Höhenmodell mit einer horizontalen Lagegenauigkeit von  $\pm 25$  Metern und einer Höhengenaugkeit von  $\pm 15$  Metern vom Anbieter Virtual World Developers Inc. Hawaii (USA) (JOINT RESEARCH CENTER (2003)) zum Einsatz. Die Daten wurden mittels des cubic convolution-Verfahrens resampled. Dadurch wird die Helligkeit der Originaldaten leicht verändert, wodurch ein Glättungseffekt eintritt und geringe Abweichungen zu den originalen radiometrischen Informationen des Sensors zu verzeichnen sind.

Im Anschluss daran wurden die geokodierten Landsat 5-Daten im Bild-zu-Bild-Verfahren auf die orthorektifizierten Landsat 7-Daten entzerrt. Dabei wurden teilweise Polynome 1. Grades, hauptsächlich aber 2. Grades eingesetzt. Als Resamplingmethode wurde das cubic convolution-Verfahren angewendet. Dieser Arbeitsprozess wurde im Deutschen Fernerkundungsdatenzentrum durchgeführt. Die Anpassung der Landsat 5-Daten war schwierig, da diese nicht als Rohdaten vorlagen sondern bereits mehrfach und mit verschiedenen Verfahren resampled wurden. Eine Dokumentation zu den bereits durchlaufenen Vorprozessierungen dieser Daten ist nicht verfügbar.

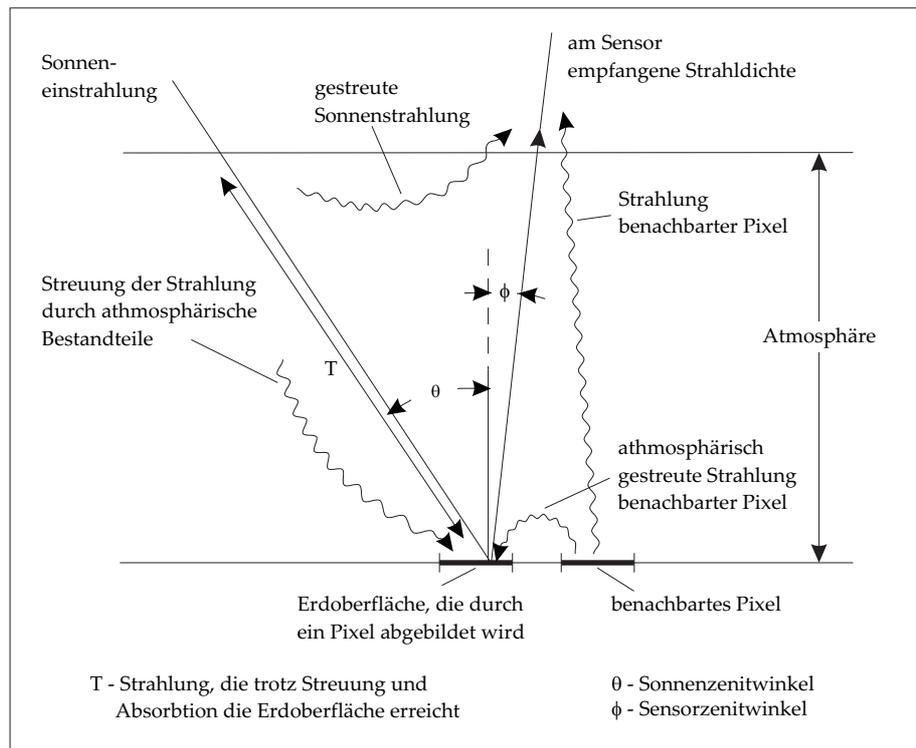
Zur Beurteilung der Genauigkeit der geometrischen Transformation kann der RMSE hinzugezogen werden. Dieser ist ein Schätzmaß für den Lagefehler der entzerrten Satellitenszenen und liegt laut Joint Research Center für die verwendeten Daten unter einem Pixel. Weiterhin wurde die Lagegenauigkeit der entzerrten Szenen stichprobenweise an markanten Punkten überprüft, die sowohl in den topographischen Karten und ausgewählten ATKIS-Layern als auch in den Satellitenszenen eindeutig zu identifizieren waren. Diese Messungen ergaben maximale Lageabweichungen von  $\pm 50$  m (2 Pixel) für die Landsat 7-Daten, währenddessen bei den Landsat 5-Daten Abweichungen von bis zu  $\pm 75$  m festzustellen waren. In den Gebirgsregionen treten die Lageabweichungen der Landsat 5-Daten häufiger als in den anderen Gebieten auf.

## 4.2 Radiometrische Korrektur

### 4.2.1 Atmosphärenkorrektur

Die vom Sensor aufgezeichnete Strahlung entspricht in ihrer Intensität und spektralen Zusammensetzung nicht derselben Strahlung, die von der Erdoberfläche reflektiert oder emittiert wird. Ursache dafür sind Absorptions- und Streuprozesse in der Atmosphäre, die durch Wolken, Aerosole und Spurengase hervorgerufen werden (siehe Abb. 4.1). Mittels unterschiedlicher Korrekturverfahren können die Einflüsse der Atmosphäre vermindert werden.

Für eine umfassende und exakte Simulation des relevanten Strahlungstransportes sind der genaue Zustand der Atmosphäre zum Aufnahmezeitpunkt und das vollständige Verständnis



**Abbildung 4.1:** Verschiedene Einflussfaktoren auf die vom Sensor empfangene Strahlung (nach RICHARDS und JIA (1999))

der beteiligten Prozesse notwendig. Mit den zur Verfügung stehenden Daten und Methoden ist dies derzeit noch nicht möglich (vgl. KAHABKA (2001)).

Die Auswertung der Landsat- und QuickBird-Szenen erfolgte mit einem überwachten Klassifizierungsverfahren, bei dem die Spektralinformationen der Objektklassen aus den Satellitenbildern selbst generiert wurden. Der temporäre Vergleich der Waldmasken (*change detection*) basiert ebenfalls auf getrennten Einzelklassifizierungen, so dass der Einfluss der atmosphärischen Störungen vernachlässigt werden kann. In ihrer Arbeit beschreiben SONG ET AL. (2001) die Atmosphärenkorrektur für Klassifizierungen und Untersuchungen von Veränderungsprozessen als nicht notwendig, sofern Trainingsdaten und das zu klassifizierende Bild im gleichen Maßstab vorliegen. Die Bewertung von Aufwand und Nutzen einer Atmosphärenkorrektur wird kontrovers diskutiert. ITTEN ET AL. (1992) erreichten nach einer Atmosphärenkorrektur nur eine Verbesserung der durchgeführten Waldklassifikation um 2%. Abgesehen von dem teils beträchtlichen Aufwand, die diese Verfahren mit sich bringen, sind die Ergebnisse der Korrektur nicht immer zufriedenstellend. Nach BIRGER (2002) wiesen atmosphärenkorrigierte Szenen im Übergangsbereich von atmosphärischem Dunst zu Gebieten ohne Dunst zum Teil Grauwertsprünge auf, die unter Umständen zu Fehlklassifizierungen führen können. Auch BORDON (1999) bemerkt, dass der durch eine Atmosphärenkorrektur bewirkte Ausgleich von Pixelwerten umstritten ist. Dies bringt neben der erwünschten Korrektur auch Fehlerquellen mit sich. Teilweise treten sogar Verschlechterungen der Klassifikationsergebnisse ein, wie bei LEU

(1991), wo die Verwendung der atmosphärenkorrigierten Datensätze zu einer Verschlechterung der Klassifikation um 4% führte. Ein weiterer Aspekt ist die Wahl der Reihenfolge von Atmosphärenkorrektur und topographischer Normalisierung (siehe Kapitel 4.2.2). Die Atmosphärenkorrektur kann zum Verlust von geringen Spektralwerten führen, die wiederum für die Beleuchtungskorrektur von großer Bedeutung sind. Von Vorteil wäre ein Verfahren, welches beide Korrekturen integriert (EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE GENERAL XII, SCIENCE, RESEARCH AND DEVELOPMENT (2000)).

#### 4.2.2 Topographische Normalisierung

Das Zusammenwirken von Relief und Sonnenstand kann innerhalb einer Szene radiometrische Inkonsistenzen hervorrufen. Diese topographisch bedingten Beleuchtungsunterschiede, die vor allem in stark reliefiertem Gelände auftreten, sollen mittels Beleuchtungskorrektur (Topographische Normalisierung) beseitigt werden. Radiometrische Modelle dienen dem Ausgleich von Beleuchtungsunterschieden an Sonnen- und Schattenhang, so dass die korrigierten Werte der Illumination im ebenen Gelände entsprechen. Aus dem Sonnenstand, das heißt Zenitwinkel ( $sz$ ) und Azimut ( $sa$ ) der Sonne zum Aufnahmezeitpunkt, Neigung ( $s$ ) und Ausrichtung (Exposition) ( $a$ ) des Geländes ergibt sich der lokale Sonneneinfallswinkel  $\cos(i)$ , mit dem die Spektralwerte nach Gleichung 4.1 korrigiert werden.

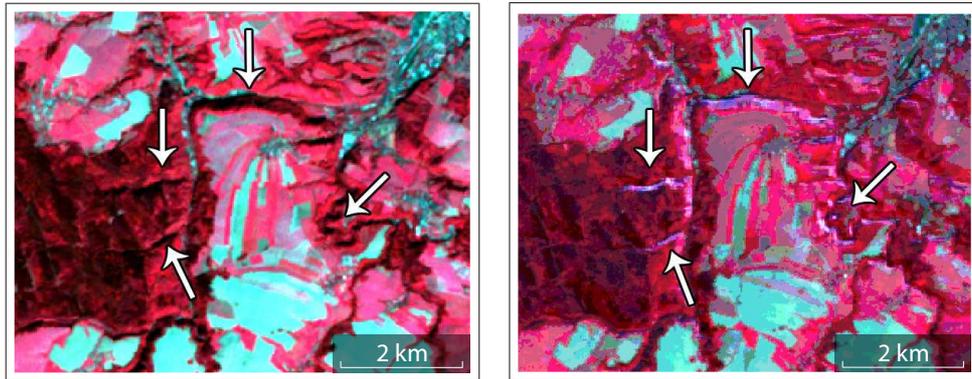
$$\cos(i) = \cos(sz) \cdot \cos(s) + \sin(sz) \cdot \sin(s) \cdot \cos(sa - a) \quad (4.1)$$

Die Angaben zu Sonnenazimut und -zenit gehen aus den zusätzlichen Informationen der Satellitendaten hervor oder können anhand der Überflugzeit errechnet werden. Angaben zu Hangneigung und Exposition werden unmittelbar aus dem Geländemodell abgeleitet. In einem weiteren Schritt erfolgt die Signaturkorrektur:

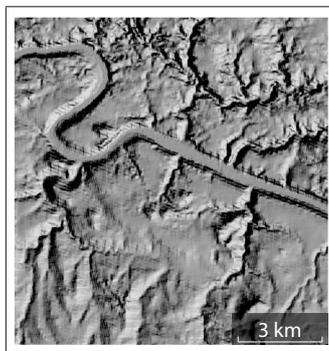
$$\text{normalisierte Signatur} = \frac{\text{Sensorsignatur}}{\cos(i)} \quad (4.2)$$

Diese einfache Kosinuskorrektur, auch als Lambert'sches Reflexionsmodell bekannt, führte allerdings zu Überkorrekturen, die an steilen Hängen und Tälern sichtbar werden (siehe Abb. 4.2).

Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass von einer gleichmäßigen Reflexion der Sonnenstrahlung in alle Richtungen ausgegangen wird. Allerdings neigen Wälder aufgrund ihrer rauen Oberfläche in Abhängigkeit zum Sonnenstand eher zur rückwärtsgerichteten Reflexion (HILDEBRANDT (1996)). Diesen gerichteten Strahlungsanteil gilt es zu kompensieren. Da das Reflexionsverhalten für einzelne Objektklassen spezifisch ist, kann ein einfacher Skalierungsfaktor nur zu einer näherungsweisen Abbildung der Realität beitragen. Untersuchungen von SCHARDT (1990), KEIL ET AL. (1990) und GU und GILLESPIE (1998) zeigen, dass von der Kronendachstruktur verschiedener Baumarten unterschiedliche Reflexionsverhalten ausgehen. Somit existiert keine einheitliche Ausgleichsfunktion bzw. kein einheitlicher Skalierungsfaktor für alle Baumarten. Daraus ist zu schlussfolgern, dass Beleuchtungskorrekturen in Abhängigkeit des zu untersuchenden Objektes klassenspezifisch durchzuführen sind, beispielsweise für



**Abbildung 4.2:** Zu korrigierender Ausschnitt einer Landsat 7-Szene (a), Ergebnisse der einfachen Kosinuskorrektur: deutliche Überkorrekturen (b)



**Abbildung 4.3:** Ausschnitt der Illumination ( $\cos(i)$ ) aus Landsat 7-Daten des UG Sachsen

Buchen und Fichten getrennt (TEILLET ET AL. (1982)). Neben den Baumarten zeigen deren natürliche Altersklassen ebenfalls ein heterogenes Verhalten hinsichtlich des Einflusses von Beleuchtungsveränderungen. Außerdem ist die Abhängigkeit des Reflexionsverhaltens von Wäldern von der Höhe über normal Null zu berücksichtigen, da mit zunehmender Höhe abnehmende Pixelwerte einhergehen. Laut BORDON (1999), BORDON ET AL. (2000) und SCHARDT (1990) kann die Beleuchtung mittels einer Stratifizierung des Untersuchungsgebietes nach Beleuchtungsstraten unter Zuhilfenahme des digitalen Höhenmodells simuliert werden.

### C-Faktor-Korrektur

In der vorliegenden Arbeit wurde die Umsetzung einer Beleuchtungskorrektur mittels der C-Faktor-Methode (TEILLET ET AL. (1982)) im Untersuchungsgebiet Sachsen evaluiert, da diese unter anderem bereits von ITTEN ET AL. (1992), SAGISCHEWSKI ET AL. (2003), TRÖLTZSCH (2004) erfolgreich angewendet wurde, zu guten topographischen Normalisierungen geführt und zu verbesserten Klassifikationsergebnissen von Waldbeständen beigetragen hat. Neben der Nor-

malisierung des direkten Strahlungsanteils wird ein Skalierungs- bzw. Korrekturfaktor  $c$  in das Verfahren integriert, der die diffuse Strahlung erfasst und zur Minderung von Überkorrekturen bei niedrigen Einstrahlungswinkeln beiträgt.  $c$  wird durch lineare Regression aus dem Zusammenhang zwischen der Beleuchtungsintensität und der am Sensor eintreffenden Strahldichte berechnet.

$$L_n = L_0 \cdot \frac{\cos(sz) + c}{\cos(i) + c} \quad \text{wobei} \quad c = \frac{b}{m} \quad (4.3)$$

mit

$L_n$  = normalisierte Strahldichte

$L_0$  = am Sensor eintreffende Strahldichte

$sz$  = Sonnenzenitwinkel

$\cos(i)$  = lokaler Sonneneinfallswinkel (siehe Gleichung 4.1)

$c$  = Korrekturfaktor

$b$  = Achsenabschnitt = Interzept

$m$  = Anstieg der Regressionsgerade

Dafür wurde die frei verfügbare Software SILVICS<sup>1</sup> (McCORMICK (1999)) und die Bildverarbeitungssoftware ERDAS Imagine verwendet. Der Ablauf des Verfahrens beinhaltet folgende Arbeitsschritte:

- Berechnung des lokalen Sonneneinfallswinkels  $\cos(i)$
- Auswahl der Trainingsgebiete der verschiedenen Illuminationen
- Regressionsanalyse mit den Originalbilddaten und der topographischen Variablen  $\cos(i)$
- topographische Normalisierung

Aufgrund der in Kapitel 6.1 dargelegten Ergebnisse wurde auf eine Topographische Normalisierung der Satellitenszenen mit der C-Faktor-Methode verzichtet.

Weitere Korrekturansätze zur Minderung topographischer Effekte sind beispielsweise von JUSTICE ET AL. (1982), COLBY (1991), ITTEN ET AL. (1992), EKSTRAND (1996) und GU und GILLESPIE (1998) untersucht und detailliert beschrieben wurden.

### 4.3 Fusion von Satellitendaten

Die Verschneidung von multispektralen mit hochauflöseren panchromatischen Daten desselben oder eines anderen Sensors kann das Informationsspektrum von Satellitendaten verbessern.

<sup>1</sup><http://inforest.jrc.it/activities/silvics/>, Stand: September 2004

Einerseits wird durch die Bildfusion die geometrische Detailschärfe gesteigert und andererseits werden die spektralen Merkmale der Ausgangsdaten kombiniert. Dabei können die Eigenschaften der spektral und räumlich unterschiedlich aufgelösten Satellitendaten in Abhängigkeit des gewählten Verfahrens nicht vollständig erhalten bleiben. Je besser die Simulation der Spektraleigenschaften in der höheren Auflösung umgesetzt werden kann, desto exakter sind die zu erwartenden Klassifikationsergebnisse basierend auf den fusionierten Daten (WALD ET AL. (1997)).

Bezugnehmend auf eine anvisierte multispektrale Klassifikation kommen nur die Verfahren in Betracht, bei denen die radiometrischen Eigenschaften der Satellitenszene weitestgehend erhalten bleiben. Aus diesem Grund wurde für die Verschneidung der Landsat-Daten das *Adaptive Image Fusion*-Verfahren gewählt.

### Adaptive Image Fusion

Der Adaptive Image Fusion (*AIF*)-Filteralgorithmus, der von STEINNOCHER (1999) zur Verfügung gestellt wurde, ermittelt über einen modifizierten Sigma-Filter homogene Objekte im panchromatischen Satellitenbild. Für diese Objekte werden anschließend die Spektralwerte der zugehörigen Pixel des multispektralen Bildes gemittelt. Somit können räumliche Strukturen der panchromatischen Szene in das fusionierte Bild übernommen werden. Mit der scharfen Darstellung von Kanten geht gleichzeitig eine Glättung innerhalb der erkannten Objekte einher, da diese durch den Mittelwert aller sich in den Objektgrenzen befindenden spektralen Informationen abgebildet werden. Dadurch können einerseits Mischpixel reduziert werden, während andererseits kleine Flächen, die sich nur unwesentlich von benachbarten Objekten unterscheiden, verlorengehen.

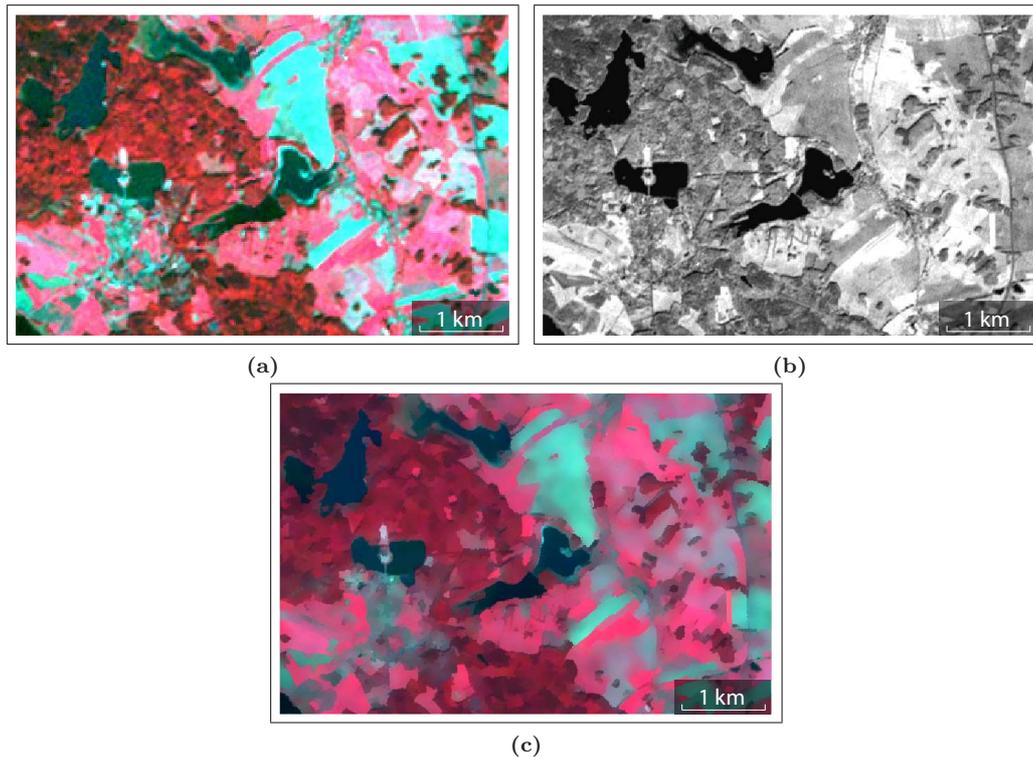
Variante	Iteration	Filtergröße	Varianz
1	1	13 × 13	0,0250
	2	13 × 13	0,0225
	3	13 × 13	0,0200
	4	13 × 13	0,0175
	5	13 × 13	0,0150
	6	13 × 13	0,0125
	7	13 × 13	0,0100
2	1	7 × 7	0,0300
	2	9 × 9	0,0200
	3	11 × 11	0,0150

Tabelle 4.1: Parameter für AIF der Landsat 7-Daten

*AIF* ist ein iterativer Filterprozess, für den die Größe der lokalen Umgebung (Filtergröße) und die normalisierte Standardabweichung als Eingangsparameter festgelegt werden müssen. Diese beiden Parameter sind keine fest definierten Größen, sondern müssen bezüglich des Untersuchungsobjektes, des Waldes, optimiert werden. Die Anzahl der Iterationen ist vom Bildmaterial und der Filtergröße abhängig. Für die Landsat 7-Daten der Untersuchungsgebiete Nord-

ostdeutschland und Sachsen wurden verschiedene Parameterkonstellationen getestet (Tabelle 4.1).

Ein Beispiel eines Fusionsproduktes ist in Abbildung 4.4 dargestellt. Im Gegensatz zu den Ausgangsdaten ist das fusionierte Bild schärfer, Objekte die nur aus einer geringen Anzahl von Pixeln bestehen, sind weniger geworden und durch die Glättung ist die spektrale Varianz innerhalb der Objekte gesunken.



**Abbildung 4.4:** Fusion von Landsat 7-Daten: multispektrale Originaldaten (a), pan-Kanal (b) und AIF-Fusion (c) (Ausschnitt des UG Sachsen: Schloß Moritzburg und Umgebung)

#### 4.4 Vegetationsindizes

Aufgrund der spezifischen Reflexionseigenschaften vitaler Vegetation können durch verschiedene Verfahren Parameter abgeleitet werden, die zur Differenzierung von unbewachsenen Oberflächen, lebender oder abgestorbener Vegetation dienen. Der bekannteste dieser Parameter, die als Vegetationsindizes bezeichnet werden, ist der Normalized Difference Vegetation Index (*NDVI*) (HILDEBRANDT (1996), COENRADIE ET AL. (2002)). Der *NDVI* kann aus dem Verhältnis der Spektralwerte des roten (*R*) und nahen infraroten Lichtes (*nIR*) charakteristische Vegetationstypen und auch Änderungen von Oberflächen hinsichtlich des Bewuchses

erfassen.

$$NDVI = \frac{nIR - R}{nIR + R} \quad (4.4)$$

Für die Landsat- und QuickBird-Daten wurde der NDVI berechnet und zur Erstellung der Waldmasken genutzt.

## 5 Methodik

### 5.1 Hard- und Software

Die Auswertung der Daten erfolgte mit verschiedenen Bildverarbeitungs-, GIS- und Datenanalyseprogrammen (Tabelle 5.1).

Software	Einsatzgebiet
ERDAS Imagine 8.5	Auswertung der Satellitendaten
ArcView 3.1	GIS, Datenaufbereitung und -auswertung
ArcGIS 9.0	GIS, Datenaufbereitung und -auswertung
SILVICS	topographische Normalisierung
Sigma_MS	Fusion von Satellitendaten (AIF)
EstimateThreshold	Schwellenwertberechnung

**Tabelle 5.1:** Verwendete Software

In Anbetracht der enormen Datenmengen ergaben sich teilweise extrem lange Rechenzeiten von mehreren Tagen für einzelne Teilaufgaben. Ausschlaggebend dafür war, dass der vorhandene Arbeitsspeicher von 1,5 Gigabyte mitunter nicht ausreichte, Berechnungen an bestehenden Daten durchzuführen. Daher mussten diese in systemgerechte Teile zerlegt werden, was zu erheblich höherem Arbeitsaufwand und Verzögerungen bei der Datenauswertung führte. Problematisch war auch die Durchführung der Datensicherung, so dass neben dem lokalen Speichervolumen von 240 Gigabyte noch externe Platten mit insgesamt 480 Gigabyte verwendet wurden.

### 5.2 Begriffsdefinition der Waldfläche

Ein bedeutendes Schlüsselmerkmal aller Waldinventuren ist die Waldfläche, da diese eine Eingangsgröße zur Berechnung flächenbezogener Zielgrößen ist, wie Vorrat/ha und Holznutzung/ha. Allerdings existieren für die begriffliche Definition des Waldes sehr unterschiedliche Varianten, sowohl national, sei es in Karten der Landesvermessungsämter, Kartierschlüsseln oder in Objektartenkatalogen, als auch international. Ein Beispiel hierfür sind verschiedene Waldflächendefinitionen (Tabelle 5.2). Für gesetzliche Definitionen der Waldfläche bedarf es operationaler und konsistenter Merkmale. Zu den wichtigsten quantitativen Kriterien zählen Mindestfläche (0,05 - 0,5 ha), Mindestbestockungsgrad und Mindestbreite (10 - 25 m) (KÖHL und PÄIVINEN (1996)).

Die Erfassung der Waldfläche Deutschlands wird gemäß der Walddefinition nach BWI (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2000)) durch terrestrische

Walddefinition	Mindestfläche (ha)	Mindestbreite (m)	Mindest- bestockungsgrad (%)	Mindest- baumhöhe (m)
Belgien	0,1	keine Angabe	10	5
Deutschland	0,1	10	keine Angabe	keine Angabe
Frankreich	0,05	15	10	keine Angabe
Griechenland	0,5	30	10	keine Angabe
Italien	0,5	20	20	5
Niederlande	0,5	30	20	keine Angabe
Österreich	0,05	10	30	keine Angabe
Schweden	0,25	keine Angabe	keine Angabe	keine Angabe
Schweiz	keine Angabe	25	20	3
FAO	0,5	20	10	5
Kyoto-Protokoll	0,05 - 1,0	keine Angabe	>10 - 30	2 - 5

**Tabelle 5.2:** Quantitative Kriterien von Waldflächendefinitionen (nach KÖHL und PÄIVINEN (1996), UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (2001), FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, FORESTRY DEPARTMENT (2004))

Stichprobenerhebungen der Bundeswaldinventur durchgeführt. Wald im Sinne der BWI ist jede mit Forstpflanzen bestockte Grundfläche.

- Als Wald gelten auch:
  - kahlgeschlagene oder verlichtete Grundflächen
  - Waldwege, Waldeinteilungs- und Sicherungstreifen, Waldblößen und Lichtungen, Waldwiesen, Wildäsungsplätze, Holzlagerplätze, im Wald gelegene Leitungsschneisen
  - weitere mit dem Wald verbundene und ihm dienende Flächen einschließlich Flächen mit Erholungseinrichtungen
  - zugewachsene Heiden und Moore, zugewachsene ehemalige Weiden, Almflächen und Hutungen sowie Latschen- und Grünerlenflächen („zugewachsen“ = wenn die natürlich aufgekommene Bestockung ein durchschnittliches Alter von fünf Jahren erreicht hat und wenn mindestens 50 % der Fläche bestockt sind)
- Nicht zum Wald gehören:
  - in der Flur oder im bebauten Gebiet gelegene bestockte Flächen unter 1000 m<sup>2</sup>
  - Gehölzstreifen unter 10 m Breite
  - Weihnachtsbaum- und Schmuckreisigkulturen
  - zum Wohnbereich gehörende Parkanlagen.

Wasserläufe ab 5 m Breite unterbrechen den Zusammenhang einer Waldfläche.

### 5.3 Extraktion der spektralen Werte

Bei der Entwicklung eines aus terrestrischer Inventur und Fernerkundung kombinierten Verfahrens zur Waldmaskenerstellung steht die Erfassung des spektralen Bereiches, den der Wald

abdeckt, im Vordergrund. Zur Erstellung von Signaturen für Wald- und Nichtwaldgebiete sind repräsentative Referenzflächen notwendig, die beide Objektklassen präzise beschreiben und auch Variabilitäten der Erscheinungsformen und sich daraus ergebende Varianzen der Spektralwerte berücksichtigen.

Zu diesem Zweck wurden alle Traktecken der Untersuchungsgebiete und deren Wald-/Nichtwald-Information (Tabelle 5.3) aus der Datenbank der BWI-Datenerhebung selektiert und den Klassen „Wald“ und „Nichtwald“ zugeordnet.

Zur begrifflichen Vereinfachung wird bestocker Holzboden nachfolgend als *Holzboden* oder *HB* bezeichnet. Wald nach der Walddefinition der Bundeswaldinventur wird verkürzt *BWI-Wald* genannt.

Schlüssel - ID	Beschreibung	
0	Nichtwald	
1	produktiver Wald, Holzboden	} bestockter Holzboden
2	unproduktiver Wald, Holzboden	
3	Wald, Blöße	} BWI-Wald
4	Wald, Nichtholzboden	

**Tabelle 5.3:** Schlüsselwerte für die Nichtwald-, Holzboden- und BWI-Wald-Zuordnung der Traktecken

Die Traktecken mit der Schlüssel-ID „0“ waren die Grundlage für die Abbildung des Nichtwaldes.

Zur Beschreibung des bestockten Holzbodens wurden die Traktecken mit der Schlüssel-ID „1“ und „2“ verwendet. Unproduktive Waldflächen sind Latschen- und Grünerlenfelder, Strauchflächen und sonstige gering bestockte oder wenig produktive Waldflächen ( $\leq 1 \text{ m}^3 \text{ dGZ/ha}$ ). Dieser bestockte Holzboden, der sich über das Reflexionsverhalten von Bäumen identifizieren lässt, wird im Weiteren als Holzboden (*HB*) bezeichnet. Als Referenzpunkte für den Holzboden wurden deshalb die von Bäumen bestockten Traktecken ausgewählt.

Die „unbestockten“ Flächen, die auch dem BWI-Wald angehören, differenzieren sich aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften deutlich vom Holzboden und müssen durch Integration von Zusatzdaten in nachfolgenden Verfahrensschritten berücksichtigt werden. Dazu zählen laut BWI-Walddefinition die Traktecken mit der Schlüssel-ID „3“ und „4“. Dabei sind Blößen vorübergehend unbestockte Holzbodenflächen. Zum Nichtholzboden gehören u.a. Waldwege, Schneisen und Schutzstreifen ab 5 m Breite, Holzlagerplätze, Wildwiesen und Wildäcker, der forstlichen Nutzung dienende Hof- und Gebäudeflächen sowie im Wald gelegene Felsen, Blockhalden, Kiesflächen und Gewässer. Auch im Wald gelegene Sümpfe und Moore gehören, wenn sie nicht zugewachsen sind, zum Nichtholzboden.

Zur Extraktion von Spektralwerten boten die hochaufgelösten panchromatischen QuickBird-Daten des Untersuchungsgebietes Pfälzerwald eine weitere Möglichkeit. Damit konnte eine fernerkundungsbasierte Auswahl unabhängiger Signaturen erhoben werden, die nach dem Zufallsprinzip über das von den Daten abgedeckte Gebiet verteilt wurden. Dabei zählen alle von

Bäumen bestockten Flächen als Holzboden (*HB*). Aufgrund des geringen Nichtwaldanteils von weniger als 20 % ist die Erfassung dessen spektraler Vielfalt bei einer Gleichverteilung der Referenzpunkte unsicher. Deshalb wurden 250 der insgesamt 600 Referenzpunkte diesem Stratum zugewiesen. Die Zuordnung der Punkte, die nachfolgend als PanQB-Referenzdaten (*PanQB*) bezeichnet werden, in die entsprechenden Straten erfolgte pixelgenau mittels visueller Interpretation der panchromatischen QuickBird-Szene. Daraus resultieren 261 Referenzpunkte zur Signaturerhebung für den Nichtwald und 327 für den Wald, die verbliebenen 12 waren nicht interpretierbar und wurden verworfen.

Für die Erstellung der Holzboden-/Nichtwaldmaske wurden für die ausgewählten Traktecken bzw. PanQB-Referenzdaten über deren Koordinaten die dazugehörigen Spektralwerte aus dem Satellitenbild extrahiert. Dies setzt eine hohe Lagegenauigkeit der BWI-Punkte an den Gauß-Krüger-Koordinaten im Gelände voraus. Ebenso ist eine präzise Georeferenzierung der Satellitendaten unabdingbar. Die Trakteckeninformationen der „unbestockten“ Waldflächen blieben bei diesem Arbeitsprozess unberücksichtigt.

Wie bereits aus Kapitel 4.1 hervorgeht, sind sowohl bei den QuickBird- als auch bei den Landsat-Daten Lagedifferenzen zu erwarten, die bis maximal 75 m (3 Landsat-Pixel) reichen. Liegen die zu extrahierenden Traktecken inmitten einer Holzbodenfläche (*HB*) ist diese Problematik weniger schwerwiegend als in Randregionen, also an Grenzen zwischen Holzboden und Nichtwald. Dadurch könnten Mischpixel oder auch Nichtwald-Signaturen entnommen werden, die bei der Erstellung des Spektralbereiches der Objektklasse Holzboden potentielle Fehlermöglichkeiten sind.

Deshalb wurden zwei verschiedene Ansätze der Spektralwertextraktion verfolgt. Einer beschränkt sich auf die Signaturerhebung über genau ein Pixel, was einer Fläche von 2,8 m x 2,8 m in der QuickBird-Szene bzw. 25 m x 25 m in der Landsat-Szene entspricht. Der andere untersucht eine Umgebung von Pixeln, beispielsweise 3 x 3, wobei der Mittelpunkt dieser Matrix den Koordinaten der Traktecke entspricht. Aus den spektralen Werten der Pixel wird der Mittelwert bzw. Median gebildet und dem Zentralpixel (Mittelpunkt) zugewiesen. Aufgrund der höheren Auflösung der QuickBird-Daten wurde die Auswirkung unterschiedlicher Filtergrößen (5 x 5, 7 x 7 und 9 x 9) auf die Waldmaskenerstellung untersucht.

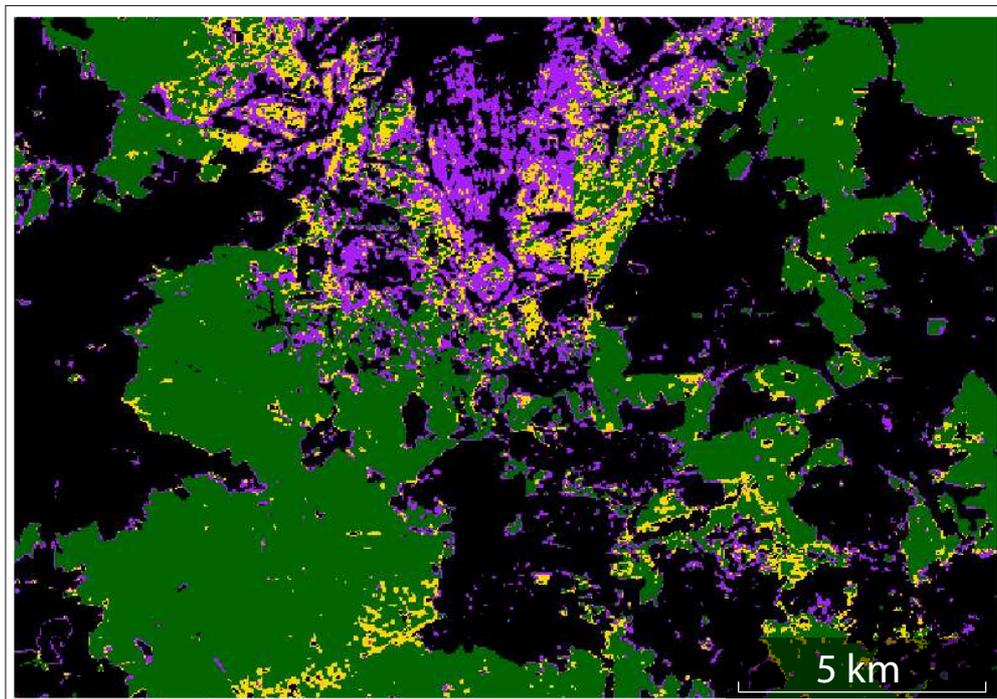
## 5.4 Verfahren zur Waldmaskenerstellung

### 5.4.1 Waldmaskenerstellung über Bestockungstypinformationen

Trotz der vorgenommenen Beschränkung des Waldes auf die Holzbodenfläche, ist diese sehr heterogen, was sich unter anderem in der Vielfalt der spektralen Eigenschaften widerspiegelt. Durch die Integration von Bestockungstypinformationen war eine Untergliederung der gesamten Holzbodenfläche in kleinere „Holzbodengruppen“ möglich. Die Gruppen wurden entsprechend der Baumartenzusammensetzung in die Bestockungstypen Nadelwald (ab 75 % Nadelbaumanteil), Laubwald (ab 75 % Laubbaumanteil) und Mischwald (Anteil von Laub- oder Nadelbäumen liegt unter 75 %) eingeteilt. Dies versprach die Abgrenzung homogenerer Objekte

und somit auch eine Reduzierung der Varianz innerhalb der Gruppe. Demzufolge wurde erwartet, dass die drei einzelnen Holzbodengruppen zuverlässiger erfasst und damit eine genauere Holzbodenmaske erstellt werden könnte.

Nach Durchführung der Signaturextraktion für das Untersuchungsgebiet Sachsen, die getrennt nach den Bestockungstypen Laub-, Nadel- und Mischwald erfolgte, nach Festlegung der Schwellenwerte nach Gleichung 5.3 und nach visuellen Anpassungen wurden Masken für die drei Holzbodengruppen gebildet. Um mögliche Beeinträchtigungen durch Lageabweichungen auszuschließen, wurde ebenfalls analysiert, ob der Median oder Mittelwert der Signaturen einer das Zentralpixel umgebenden  $3 \times 3$ -Matrix andere Signaturwerte und somit Schwellenwerte ergibt, was nicht der Fall war. Während der Bestockungstyp Nadelwald relativ zuverlässige Ergebnisse lieferte, waren in der Laubwaldgruppe Überschneidungen mit landwirtschaftlichen Signaturen festzustellen. Ähnliche Überlappungen waren in der Mischwaldgruppe zu finden. Verschiedene Kombinationen der Einbindung der Einzelmasken in eine Gesamtholzbodenmaske ergaben jedoch keine zufriedenstellenden Ergebnisse (siehe Tabelle 5.4), was sowohl durch visuelle Überprüfung mit Orthofotos als auch durch Genauigkeitsanalysen bestätigt wurde. Ursache dafür ist die schwierige Trennung zwischen sehr ähnlichen Signaturen des Holzbodens und des Nichtwaldes, die auch durch eine Unterteilung der Holzbodensignaturen in Nadel-, Laub- und Mischwaldgruppen nicht verbessert werden konnte. Aus diesem Grund wurde dieser Ansatz zur Erstellung der Holzbodenmaske nicht weiterverfolgt.



**Abbildung 5.1:** Ausschnitt aus Gesamtholzbodenmaske des UG Sachsen kombiniert aus Nadel- (dunkelgrün), Laub- (lila) und Mischwaldgruppe (gelb), Nichtwald (schwarz)

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit <sup>1</sup>	Nutzer- genauigkeit <sup>1</sup>	Gesamt- genauigkeit
Wald (Referenz)	623	74	89,38%	81,87%	91,36%
Nichtwald (Referenz)	138	1618	92,14%	95,63%	

Tabelle 5.4: Genauigkeiten der kombinierten Gesamtholzbodenmaske (Laub-, Nadel- und Mischwald) UG Sachsen

### 5.4.2 Schwellenwertverfahren

Die Stratifizierung der Satellitendaten in Holzboden und Nichtwald wurde mittels eines Schwellenwertverfahrens durchgeführt. Hinter diesem Verfahren steht die folgende Prozedur: Zunächst werden aus den spektralen Signaturen des Holzbodens für jeden betrachteten Kanal  $k$  eine untere Grenze  $G_u(k)$  und eine obere Grenze  $G_o(k)$  festgelegt. Anschließend wird für jedes Pixel geprüft, ob es in allen Kanälen innerhalb der definierten Grenzen liegt. Ist dies der Fall, wird es als Holzboden deklariert, andernfalls als Nichtwald.

Auch in anderen Arbeiten hat sich das Schwellenwertverfahren als effektive Methode der Klassifizierung herausgestellt. Die Ableitung der Waldmaske durch Schwellenwerte hat den Vorteil, dass Nichtwald-Objekte weitestgehend ausgeschlossen werden und bei anschließenden detaillierten Waldklassifizierungen mit arbeitsintensiven Verfahren, wie der Maximum-Likelihood-Klassifizierung, nicht mehr berücksichtigt werden müssen. KEIL ET AL. (1990) beschreiben verschiedene multitemporale Ansätze der Waldmaskenbildung über Schwellenwertverfahren mit Landsat-TM Daten. SCHARDT (1990) hat für die Trennung von Laub- und Nadelwald unterschiedlicher, kleinräumiger Untersuchungsgebiete Schwellenwerte für jeweils zwei Aufnahmezeitpunkte gebildet. Für die monotemporale Kartierung von heterogenen Totholzflächen bewährte sich bei COENRADIE (1992) ein Schwellenwertverfahren basierend auf Infrarot-Kanälen (TM4, TM5, TM4-TM5) und einer Hauptkomponententransformation.

### 5.4.3 Bestimmung der Schwellenwerte

Die Bestimmung der Schwellenwerte ist essentiell für die Genauigkeit der resultierenden Waldmaske. Ausgangspunkt dafür sind die spektralen Signaturen von Referenzpunkten des Holzbodens und des Nichtwaldes. Von Bedeutung dabei ist, dass die Referenzpunkte jeweils die gesamte spektrale Vielfalt von Wald und Nichtwald widerspiegeln. Andernfalls führen die festgelegten Schwellenwerte zu Fehlklassifizierungen, auch wenn sich dies nicht unmittelbar in der ebenfalls durch die Referenzpunkte bestimmten Genauigkeit niederschlägt.

Im Folgenden seien  $HB$  die Menge der Holzbodensignaturen mit  $HB_i(k)$  dem Wert des  $i$ -ten Holzbodenreferenzpunktes für den Kanal  $k$ . Entsprechend sind die Nichtwaldreferenzpunkte  $NW$  bzw.  $NW_i(k)$  für die Werte in den einzelnen Kanälen.

<sup>1</sup>siehe Kapitel 5.6.2 für Definitionen

### Annahme der perfekten Klassifizierung

Wenn eine „perfekte“ Klassifizierung und damit eine Genauigkeit von 100 % möglich wäre, müssten alle Holzbodensignaturen innerhalb der Schwellenwertgrenzen liegen und alle Nichtwaldpunkte entsprechend außerhalb. In diesem Fall lassen sich die Schwellenwerte wie folgt berechnen:

$$G_u(k) = \min_{i=(1..n)} HB_i(k) \quad (5.1)$$

$$G_o(k) = \max_{i=(1..n)} HB_i(k) \quad (5.2)$$

In der daraus entstandenen Waldmaske müssten demzufolge die Holzboden- und Nichtwaldpunkte ausnahmslos den entsprechenden Straten Holzboden bzw. Nichtwald zugeordnet worden sein. Sobald ein falsch zugewiesener Punkt festzustellen ist, lässt das auf eine Überlappung der Signaturen schließen. In diesem Fall kann für die vorliegenden Daten, egal mit welchen Schwellenwerten, keine perfekte Waldmaske erstellt werden.

Wie nicht anders zu erwarten konnte für keine der betrachteten Szenen der Untersuchungsgebiete eine „perfekte“ Waldmaske geschaffen werden, da sich die spektralen Merkmale von Holzboden und Nichtwald in allen Satellitenbildern überschneiden. Der Überlappungsbereich kann in Abhängigkeit unterschiedlicher Einflussgrößen, wie den vorzufindenden Landnutzungsclassen, deren Ähnlichkeit, den Fehlern der Referenzdaten, der Lageungenauigkeit und dem Aufnahmezeitpunkt der Satellitendaten variieren. Wenn folglich eine fehlerfreie Waldmaske nicht erstellt werden kann, ist das Ziel des Schwellenwertverfahrens die optimale Zuweisung aller extrahierten Signaturen in beide Objektklassen und eine geringe Fehlklassifizierungsrate. Das heißt, die optimalen Schwellenwerte sind diejenigen, durch die die Summe von ausgeschlossenen Holzbodenpunkten (Fehler 1. Art) und in den Grenzen eingeschlossenen Nichtwaldpunkten (Fehler 2. Art) minimal wird.

### Annahme der 95 % igen Genauigkeit

Unter der Annahme, dass die Fehler in den Signaturen des Waldes bei ungefähr 5 % liegen und gleichmäßig im Bereich der unteren und oberen Grenze verteilt sind, werden bei der Bestimmung der Schwellenwerte die 2,5 % niedrigsten und höchsten Werte eines jeden Kanals ignoriert. Dies führt zu folgenden Grenzen:

$$G_u(k) = \mu(k) - 2 \cdot \sigma(k) \quad (5.3)$$

$$G_o(k) = \mu(k) + 2 \cdot \sigma(k)$$

mit

$$\mu(k) = \frac{\sum_{i=1}^n HB_i(k)}{n}$$

$$\sigma(k) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (HB_i(k) - \mu(k))^2}{n^2}}$$

mit

- $G_u$  = untere Grenze
- $G_o$  = obere Grenze
- $k$  = Kanal
- $\mu$  = Mittelwert
- $\sigma$  = Standardabweichung
- $HB_i$  = Wert des i-ten Holzbodenreferenzpunktes
- $n$  = Stichprobenumfang

Dieses Verfahren lieferte bei allen Szenen gute Ergebnisse. Jedoch ergaben bereits geringfügige Änderungen der Schwellenwerte Kombinationen mit höheren Genauigkeiten (Tabelle 5.5). Demzufolge sind die nach der beschriebenen Methode ermittelten Waldmasken in aller Regel nicht optimal.

	- unter Annahme der 95%-igen Genauigkeit -			- Methode der schrittweisen Verbesserung -			Waldmaske
	Holzboden	Nichtwald	Gesamtgenauigkeit	Holzboden	Nichtwald	Gesamtgenauigkeit	
Wald (Referenz)	1196	227	92,33%	1322	101	94,68%	UG 2, Ostszene, Landsat 7
Nichtwald (Referenz)	97	2706		124	2679		
Wald (Referenz)	287	35	90,60%	307	15	93,19%	UG 4, Westszene, Landsat 7
Nichtwald (Referenz)	23	272		27	268		
Wald (Referenz)	393	57	86,51%	378	72	88,55%	UG 1, Südszene, Landsat 5
Nichtwald (Referenz)	55	325		23	357		
Wald (Referenz)	390	91	88,84%	460	21	94,03%	UG 5, Landsat 5
Nichtwald (Referenz)	10	414		33	391		

**Tabelle 5.5:** Gegenüberstellung der Genauigkeiten einer Auswahl von Waldmasken, die unter Annahme der 95%igen Genauigkeit bzw. mittels der schrittweisen Verbesserung für die Untersuchungsgebiete Westliches Mittelgebirge (UG 1), Nordostdeutschland (UG 2), Alpen (UG 4) und Pfälzerwald (UG 5) erzielt wurden

### Kombinatorische Bestimmung des Optimums

Moderne Rechentechnik und effiziente Programmierung ermöglichen die Kalkulation von mindestens 500 Varianten von Schwellenwerten pro Sekunde, was die Berechnung der Genauigkeit und Speicherung der besten Variante beinhaltet. Da die Landsat-Satellitenszenen in jedem Kanal als 8 bit Integer vorliegen, kann jedes Pixel pro Kanal nur  $2^8 = 256$  verschiedene Werte annehmen, so dass der Gedanke nahe lag, alle Varianten zu berechnen und so die tatsächlichen optimalen Werte zu finden.

Da obere und untere Grenze getrennt gewählt werden können, entspricht dies einer Anzahl möglicher Schwellenwertkombinationen  $N$  für jeden Kanal  $k$  von

$$\begin{aligned} N(k) &= \sum_{i=1}^{256} i & (5.4) \\ &= \frac{256}{2} \cdot (256 + 1) \\ &= 3,2896 \cdot 10^4 \end{aligned}$$

Für die vorliegenden 8 Kanäle (Landsat 7 + NDVI) ergibt das eine Anzahl von Möglichkeiten  $N$

$$\begin{aligned} N &= \prod_{i=1}^8 N(i) & (5.5) \\ &= 32896^8 \\ &= 1,37134 \cdot 10^{36} \end{aligned}$$

Bei den oben genannten 500 Varianten pro Sekunde dauert eine Berechnung dieser enormen Anzahl von Kombinationen  $8,7 \cdot 10^{25}$  Jahre.

Durch vereinfachende Annahmen kann die Anzahl der Varianten und somit die Rechenzeit erheblich reduziert werden, denn es müssen nicht alle Kanäle verwendet werden. Der Landsat-Kanal 6 blieb bei allen Auswertungen aufgrund der geringen Auflösung unberücksichtigt. Die Landsat-Kanäle 5 und 7 korrelieren stark, so dass die Verwendung auf einen der beiden Kanäle beschränkt werden kann. Dessen ungeachtet liefert die Kombinatorik keine praktikable Methode zur Annäherung an die optimalen Schwellenwerte und wurde deshalb nicht angewendet.

### Methode der schrittweisen Verbesserung

Ausgehend von der durch Gleichung 5.3 beschriebenen suboptimalen Variante wurde versucht, schrittweise bessere Schwellenwerte zu erreichen. Ausgangspunkt hierfür ist die bisher beste Schwellenwertkombination. Davon wird per Zufall eine Grenze ausgewählt und für diese alle zulässigen Varianten durchgerechnet. Ergibt eine der Varianten eine höhere Genauigkeit als die bisher beste Kombination, wird sie gespeichert. Dieser Vorgang der iterativen Verbesserung wird solange wiederholt, bis keine weitere Steigerung der Genauigkeit zu beobachten ist.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass sich das nach circa 1.000 Iterationen gefundene Optimum nicht mehr verbessern läßt. Durch die zufällige Reihenfolge der gewählten Kanäle und Grenzen werden gelegentlich verschiedene Ergebnisse erreicht, die jedoch nur mit minimalen Unterschieden in der Genauigkeit verbunden sind. Die Ermittlung der Schwellenwerte nach obigem Verfahren erfolgte mittels der dafür entwickelten Software EstimateThreshold (OEHMICHEN und WILLKOMMEN (2004)).

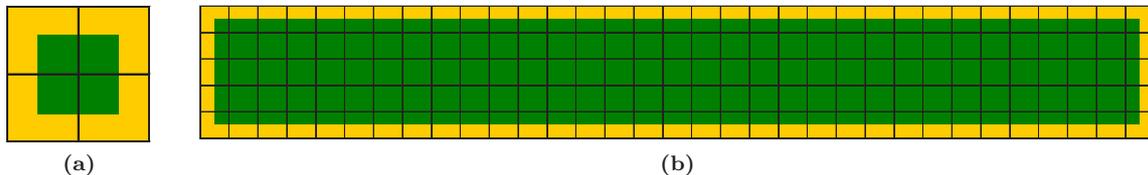
## 5.5 Anpassung der Holzbodenmaske an die BWI-Walddefinition

Wenn die Untersuchungsgebiete von mehreren Satellitenszenen abgedeckt waren, wurde für jede Szene eine getrennte Holzbodenmaske erstellt. Diese Herangehensweise ist insbesondere durch die verschiedenen Aufnahmezeitpunkte der Satellitendaten erforderlich, an die bestimmte Datenvorverarbeitungsprozeduren gekoppelt sind (siehe Kapitel 4). Im Überlappungsbereich der Szenen wurde eine Verschneidungsgrenze festgelegt und die Einzelmasken zu einer „Gesamtholzbodenmaske“ mosaikiert, die dann durch die einzelnen Adaptionsschritte an die BWI-Walddefinition angepasst wurde.

Die aus dem Schwellenwertverfahren resultierenden Holzbodenmasken sind stark strukturiert. Einerseits ist das sowohl auf die Waldverteilung in den Untersuchungsgebieten als auch auf eine große Anzahl von Einzelpixeln bzw. Kleinstflächen zurückzuführen, die für heterogene Objektklassen, zu denen der Wald bzw. Holzboden aufgrund seiner großen spektralen Vielfalt zählt, charakteristisch sind. Andererseits können diese Objekte auch Fehlklassifikationen darstellen. Für nachfolgende Auswertungen und Veränderungsrechnungen haben die genannten Kleinstflächen je nach Anzahl und Ausdehnung erhebliche Auswirkungen, so dass zu prüfen ist, inwiefern sie eine Abbildung der Realität darstellen oder den Fehlklassifizierungen zuzuordnen sind. In letzterem Fall sind die fehlklassifizierten Objekte durch geeignete Verfahren zu reduzieren.

Holzbodenflächen mit geringer Flächengröße sind an die Walddefinition der BWI anzupassen, denn diese fordert eine festgelegte Mindestgröße in der Flur oder im bebauten Gebiet gelegener bestockter Flächen von  $1.000 \text{ m}^2$ . In der Holzbodenmaske entspricht das einer Fläche von 1,6 Landsat- bzw. 127,6 QuickBird-Pixeln. Eine pixelscharfe Zuweisung dieser Holzbodenflächen zum Nichtwald ist technisch nicht umsetzbar, da nicht von objektreinen Holzbodensignaturen ausgegangen werden kann, die lagegenaue Überdeckung zwischen Pixel und dem Bestand nicht gegeben ist und keine Abtrennung im Subpixelbereich vorgenommen werden kann. Daraus resultiert eine hohe Wahrscheinlichkeit für Mischsignaturen innerhalb eines Pixels durch den Bestand und angrenzende andere Landnutzungsformen. Als Lösungsansatz zur Erfassung dieser kleinen, bestockten Flächen, in die auch Mischpixel integriert sein können, wurde um die von der BWI vorgegebene Mindestflächengröße ein Pufferbereich von einem Pixel gelegt. Diese Vorgehensweise würde bei den Landsat-Daten zu einer Ausweisung von Flächen mit  $7.500 \text{ m}^2$  führen, was nicht vertretbar ist. Als optimal hat sich eine Mindestbestockungsfläche von mehr als 4 Landsat-Pixeln ( $2.500 \text{ m}^2$ ) bzw. 200 QuickBird-Pixeln ( $1.568 \text{ m}^2$ ) herausgestellt. In Abbildung 5.2 (a) ist der Fall dargestellt, dass die als Holzboden ausgewiesene Fläche weniger als  $1.000 \text{ m}^2$  beträgt und auf vier Landsat-Pixel aufgeteilt ist. Die Signaturen der Pixel sind

keine reinen Holzbodensignaturen, sondern Mischpixel. Aufgrund der zur Eliminierung dieser bestockten Flächen festgelegten Anzahl von vier Pixeln wird diese „Kleinstholzbodenfläche“ dem Nichtwald zugewiesen. Derselbe Sachverhalt ist in Abbildung 5.2 (b) für QuickBird-Daten dargestellt.

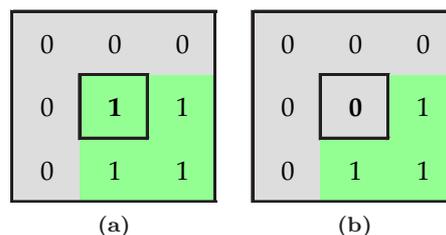


**Abbildung 5.2:** Herleitung der geeigneten „Mindestbestockungsfläche“ nach BWI-Walddefinition für Landsat-Daten (1 Pixel = 25 \* 25 m) (a) und QuickBird-Daten (1 Pixel = 2,8 \* 2,8 m) (b) (grün - reelle bestockte Fläche, gelb - Mischpixelbereich)

Im Gegensatz zu den „Holzbodenklaven“ inmitten des Nichtwaldes tauchen auch Lücken innerhalb der Objektklasse Holzboden auf. Ursache dafür können unter anderem Blößen, gering bestockte Flächen oder Waldwege sein, die laut Definition BWI-Wald sind, aber durch das Schwellenwertverfahren nicht als Holzboden identifiziert werden. Diese unbestockten Flächen sollen nicht in die Holzbodenmaske aufgenommen werden.

### 5.5.1 Medianfilterung

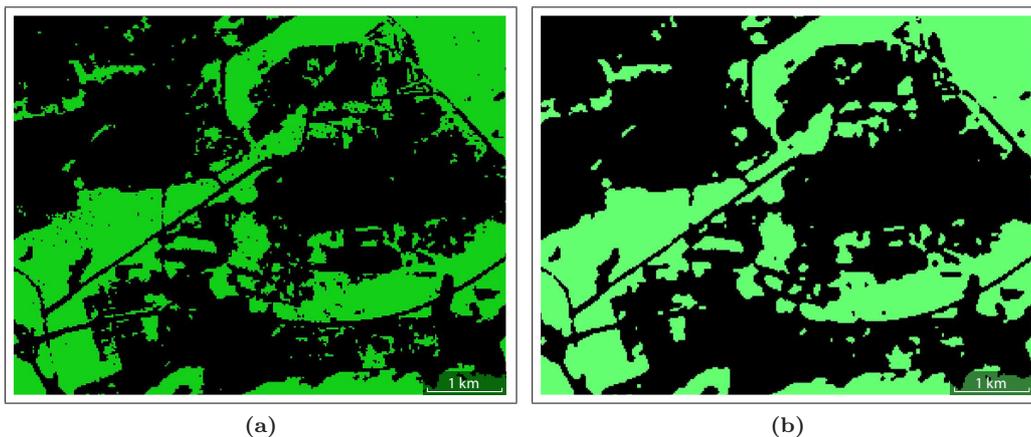
Der Medianfilter ist ein über das gesamte Bild gleitender Filter mit einer festgelegten Größe, typischerweise quadratisch mit ungerader Kantlänge. Zur Analyse der Daten bewegt sich der Filter pixelweise über das Bild und an jeder Position der Matrix wird dem Zentralpixel der über die umgebenden Nachbarschaftspixel berechnete Wert des Medians zugeordnet (siehe Abb. 5.3). Das Ziel der Filterung ist, die sehr kleinen Flächen der Holzbodenmaske an deren Umgebung anzupassen und dadurch zu verringern. Deshalb wurde für die Filterung eine 3 x 3 Pixel-Matrix gewählt.



**Abbildung 5.3:** Beispiel für die Medianfilterung: a) Ausgangssituation: Zentralpixel gehört zur Objektklasse Holzboden (1) b) Ergebnis der Filterung: Zentralpixel wurde der Klasse Nichtwald (0) zugeschlagen

Die Medianfilterung wurde an Holzbodenmasken basierend auf Landsat 5- und Landsat 7-Daten getestet (siehe Abb. 5.4). Eine erste visuelle Beurteilung der Daten fällt positiv aus, denn

im Gegensatz zu den stark strukturierten Eingangsdaten sind die gefilterten Bilder geglättet und übersichtlicher. Die Kleinstobjekte ausserhalb des Holzbodens wurden in Nichtwald umgewandelt. Eine detailliertere Betrachtung der Ergebnisse zeigt weitere Veränderungen: linienförmige Objekte, wie Gehölzstreifen, gehen durch den Filterprozess komplett verloren, Objekttecken, sowohl vom Holzboden als auch vom Nichtwald, werden abgerundet (siehe Abb. 5.3) oder kommen neu hinzu, so dass die Form von Objekten geändert wird und parallel zur Reduzierung der Kleinstflächen wird die „löchrige“ Holzbodenstruktur ebenfalls an die Umgebung adaptiert und in zusammenhängendere, einheitlichere Flächen umgewandelt. Diese Effekte der Medianfilterung führen dazu, dass potentielle Veränderungsflächen verlorengehen und dadurch Fehler in der Holzbodenmaske entstehen.

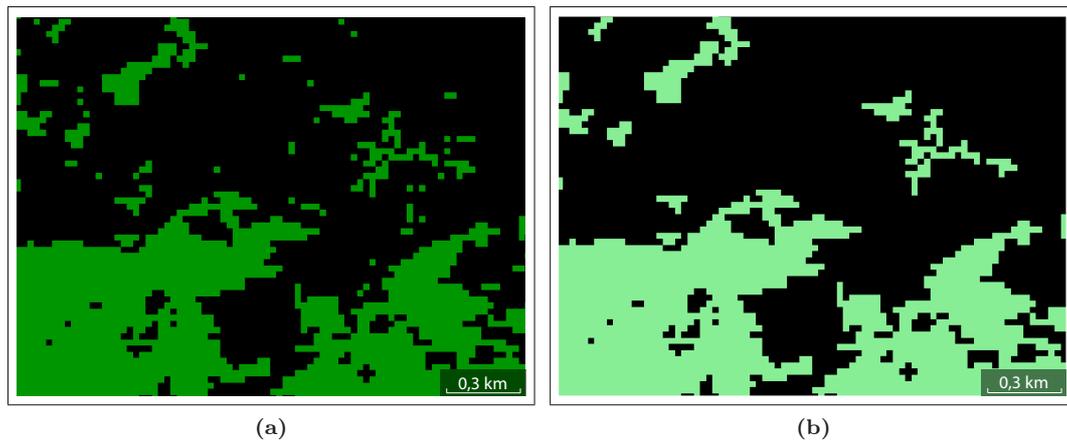


**Abbildung 5.4:** Unterschiede zwischen ungefilterter (a) und mediangefilterter (b) LS7-Holzbodenmaske, UG Pfälzerwald (grün - Holzboden, schwarz - Nichtwald)

Aufgrund der beschriebenen Effekte, die für die weitere Bearbeitung der Holzbodenmasken von Nachteil wären, wurde die Medianfilterung nicht eingesetzt.

### 5.5.2 Eliminierung von Kleinstholzbodenflächen

Die Motivation zur Wahl eines anderen Verfahrens bestand darin, die zu eliminierenden Flächen bewusst auswählen zu können. Deshalb wurde eine Methode entwickelt, die sich auf Kleinstholzbodenflächen innerhalb des Stratums Nichtwald konzentriert. Im ersten Schritt des Verfahrens werden zusammenhängende Gruppen von Pixeln identifiziert. Von diesen „Gruppen“ sind nun diejenigen zu eliminieren, die aus vier Landsat- (bzw. 200 QuickBird-) oder weniger Pixeln bestehen. Dieses „clump & sieve“-Verfahren ermöglicht den exakten Zugriff auf die Kleinstholzbodenflächen und alle anderen Objekte bleiben davon unberührt (siehe Abb. 5.5). Aufgrund der zuverlässigen Arbeitsweise wurde dieser Berechnungsprozess routinemäßig zur Erstellung der Waldmasken eingesetzt.



**Abbildung 5.5:** Ausschnitt einer ungefilterter LS5-Holzbodenmaske des UG Westliches Mittelgebirge (a) und nach erfolgter Eliminierung der Kleinstflächen (b) (grün - Holzboden, schwarz - Nichtwald)

### 5.5.3 Adaption der Holzbodenmaske durch Zusatzdaten an die BWI-Walddefinition

Mit der Holzbodenmaske wurden produktive und unproduktive Waldflächen erfasst. Zum BWI-Wald zählen daneben einerseits auch Waldblößen und Nichtholzbodenflächen, wie Holzlagerplätze, Wildäsungsplätze, Waldwiesen, im Wald gelegene Felsen, Blockhalden, Gewässer sowie nicht zugewachsene Sümpfe und Moore und andererseits werden bestimmte bestockte Flächen explizit ausgeschlossen, wie zum Wohnbereich gehörende Parkanlagen (siehe Kapitel 5.3). Entsprechend der BWI-Walddefinition wurde eine Abfolge einzelner Adaptionsschritte aufgestellt, für die flächendeckende Zusatzdaten erforderlich sind, mit denen die bereits von den „Kleinstwaldflächen“ bereinigte Holzbodenmaske in eine Waldmaske umgewandelt werden soll. Für diese Aufgabe kamen ATKIS-Daten zum Einsatz, die zwischen 1993 und 2000 erhoben wurden. Daraus können gegebenenfalls Aktualitätsdefizite resultieren. Aufgrund des vorliegenden Datenmaterials konnten nur die Landsat 7- und QuickBird-Daten diesem Verfahren unterzogen werden.

Ähnlich den Kleinstholzbodenflächen ausserhalb des Waldes fallen „Löcher“ innerhalb geschlossener Waldgebiete auf. Eine nähere Betrachtung dieser kleinen, im Wald gelegenen nicht bestockten Flächen der Holzbodenmaske zeigt folgende Zuordnungsmöglichkeiten:

- Waldblößen
- Nichtholzboden (z.B. Waldwiesen, im Wald gelegene Felsen, Sümpfe, Moore)
- nicht korrekt klassifizierter Holzboden
- richtig klassifizierter Nichtwald.

Im Zuge der Anpassung an die BWI-Walddefinition sollen diese Flächen mit Hilfe digitaler Zusatzdaten korrigiert werden. Dazu wurden aus den ATKIS-Daten die zu den Objektarten

Heide, Moor, Sumpf, Wald und Gehölz zugehörigen Flächen in einem Vektordatensatz zusammengefasst. Da die Größe der in die Holzbodenmaske zu integrierenden Flächen in der BWI-Walddefinition nicht spezifiziert ist, musste diese experimentell ermittelt werden. Optimale Ergebnisse mittels Genauigkeitsanalyse wurden für Flächengrößen bis maximal 1,4 ha erreicht, die dann bei der Verschneidung der Holzbodenmaske mit dem Vektordatensatz berücksichtigt wurden.

Weiterhin schließt die BWI-Walddefinition verschiedene bestockte Flächen bzw. Landnutzungsformen aus, zu denen beispielsweise zum Wohnbereich gehörende Parkanlagen und Baumschulen zählen. Dafür wurden ATKIS-Informationen für die Objekte Gartenland, Sonderkulturen und Siedlungen hinzugezogen, in einem Vektorlayer zusammengefasst und mit der Holzbodenmaske verschritten. Dieser Adaptionsschritt an den BWI-Wald führt zur Reduzierung der Waldfläche.

Nach Fertigstellung der Waldmaske sind durch die Verschneidung bedingte Lageabweichungen zu prüfen und gegebenenfalls zu korrigieren. Zur Beurteilung der Genauigkeit der Waldmaske wird anschließend eine Validierung durchgeführt. Um die Möglichkeit zum Vergleich mit der Holzbodenmaske zu gewährleisten, werden dafür identische Referenzpunkte verwendet. In Tabelle 5.6 ist abschließend der Ablauf des gesamten Verfahrens zur Waldmaskenerstellung zusammengefasst.

Arbeitsschritt	Beschreibung
1	Festlegung der Schwellenwerte und Erstellung der Holzbodenmaske
2	Ggf. Mosaikierung zu Gesamtholzbodenmaske
3	Eliminierung von Kleinstholzflächen der Holzbodenmaske
4	Genauigkeitsanalyse der angepassten Holzbodenmaske
5	Korrekturen kleiner, im Wald gelegener Nichtwaldflächen der Holzbodenmaske
6	Adaption der Holzbodenmaske durch Zusatzdaten an die BWI-Walddefinition
7	Kontrolle und gegebenenfalls Korrektur von verschneidungsbedingten Lageabweichungen
8	Genauigkeitsanalyse der Waldmaske

Tabelle 5.6: Verfahrensablauf zur Waldmaskenerstellung

## 5.6 Genauigkeitsanalyse

### 5.6.1 Einführung

Um die Qualität einer Waldmaske einzuschätzen, müssen die klassifizierten Satellitendaten verifiziert werden. Die Genauigkeitsbewertung (*Accuracy Assessment*) dient dem Vergleich zwischen Klassifikation und geeigneten Daten, von denen angenommen wird, dass sie „richtig“ sind. Da die Überprüfung jedes einzelnen Pixels einer Satellitenszene selten realisierbar ist, werden Referenzdaten (Pixel, Polygone oder Cluster) ausgewählt, deren korrekte Klassifikation bekannt ist. Diese werden als Bodendaten bzw. Geländereferenz (*ground truth*) bezeichnet.

### 5.6.2 Verfahren zur Genauigkeitsanalyse

Eine verbreitete Methode der Genauigkeitsanalyse ist die Darstellung der Klassifizierungsergebnisse in der Form von Konfusions- bzw. Fehlermatrizen. Dies ist ein effektiver Weg Genauigkeiten klar und übersichtlich abzubilden, wobei sowohl Fehler erster Art (*Ausschluss - omission*) und Fehler zweiter Art (*Einschluss - comission*) in die Matrix eingebunden sind. Die Fehlermatrix stellt die Anzahl von Stichprobenpunkten einer Klasse im Verhältnis zu denen anderer Klassen in Zeilen und Spalten dar. Die Diagonale der Matrix entspricht den Übereinstimmungen zwischen klassifizierten Objekten und den entsprechenden Referenzdaten einer Objektklasse. Ein Ergebnis einfacher beschreibender Statistik ist die Gesamtgenauigkeit, das heißt der Quotient aus Anzahl der korrekt klassifizierten Pixel und Gesamtanzahl der Pixel.

	Wald (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Summe Zeile	Hersteller- genauigkeit
Wald (Referenz)	200	50	250	80,00%
Nichtwald (Referenz)	80	300	380	Nutzer- genauigkeit
Summe Spalte	280	350	630	71,43%

Tabelle 5.7: Beispiel einer Fehlermatrix mit Hersteller- und Nutzergenauigkeit

Bei der Bewertung der Fehlermatrix gibt es verschiedene Aspekte der Klassengenauigkeit :

- Anzahl der richtig klassifizierten Pixel zu Gesamtanzahl Referenzpixel einer Klasse = Wahrscheinlichkeit, dass Referenzpixel richtig klassifiziert wurde (*nach CONGALTON (1991) Producer Accuracy (Herstellergenauigkeit)*)
- Anzahl der richtig klassifizierten Pixel zu Gesamtanzahl der Pixel einer Klasse des thematischen Layers = Wahrscheinlichkeit, mit der klassifiziertes Pixel der Karte/thematischen Layers diese Klasse in der Realität darstellt (*nach CONGALTON (1991) User Accuracy (Nutzergenauigkeit)*)

Die Fehlermatrix ist ebenso ein Ausgangspunkt für analytische Methoden der Genauigkeitsanalyse. Ein diskreter multivariater Ansatz ist der Kappa-Koeffizient  $\kappa$  (CONGALTON (1991)), der ein Maß für die Übereinstimmung ist.  $\kappa$  ist definiert über die Elemente der Fehlermatrix  $x_{ij}$ , die Gesamtanzahl der Referenzpixel  $n$  und die Anzahl der Klassen  $K$ :

$$f_b = \frac{\sum_{i=1}^K x_{ii}}{n}$$

$$f_z = \frac{\sum_{i=1}^K x_i + x_{+i}}{n^2}$$

$$\begin{aligned}\kappa &= \frac{f_b - f_z}{1 - f_z} \\ \kappa &= \frac{n \sum_{i=1}^K x_{ii} - \sum_{i=1}^K x_{i+} x_{+i}}{n^2 - \sum_{i=1}^K x_{i+} x_{+i}} \quad -1 \leq \kappa \leq +1\end{aligned}\quad (5.6)$$

mit

$$\begin{aligned}x_{i+} &= \sum_{j=1}^K x_{ij} \quad \text{Summe der Zeile } i \\ x_{+j} &= \sum_{i=1}^K x_{ij} \quad \text{Summe der Spalte } j\end{aligned}$$

Der Kappa-Koeffizient drückt die entsprechende Reduzierung des Fehlers beim Klassifikationsprozess im Vergleich zum Fehler einer vollständig zufälligen Klassifizierung aus. An einem Beispiel veranschaulicht bedeutet dies, dass für  $\kappa = 0.92$  der Klassifikationsprozess 92% der Fehler vermeidet, die bei einer komplett zufälligen Klassifizierung entstehen würden. In der Literatur wird ein Wert von  $\kappa > 0.8$  als sehr hohes (ALTMANN (1991)) bzw. exzellentes Maß der Übereinstimmung (KOMAGATA (2002)) bewertet.

### 5.6.3 Faktoren der Genauigkeitsanalyse

Bevor mit der Genauigkeitsanalyse begonnen werden kann, müssen verschiedene Faktoren berücksichtigt und überdacht sein. Dazu zählen unter anderem Aufnahme der Referenzdaten, Klassifikationsschema, Stichprobenumfang der Referenzdaten und Stichprobenschema. Eine unsachgemäß entstandene Fehlermatrix kann keine zufriedenstellenden Ergebnisse liefern und wäre nicht repräsentativ für die Güte der Klassifizierung.

**Aufnahme der Referenzdaten:** In Abhängigkeit vom Detaillierungsgrad der Klassifikation kann die Aufnahme von Referenzdaten sehr schwierig sein (z.B. Kronenschlussgrad, Durchmesserklassen bei forstlichen Untersuchungen). Fehler in den Referenzdaten verschlechtern die Aussagen der Genauigkeitsanalyse und führen letzten Endes zur geringen Akzeptanz von Auswertungen, die auf Satellitendaten beruhen.

**Klassifikationsschema:** Entweder es kommen bereits bestehende Schemata zum Einsatz oder es müssen Änderungen bzw. Neuentwicklungen nach Vorgaben, Ziel und Zweck des entsprechenden Projektes vorgenommen werden. Jedoch sollte diese Thematik weit vor Beginn der Genauigkeitsanalyse abgeschlossen sein.

**Stichprobenschema:** Eine schlechte Wahl des Stichprobenschemas kann zu signifikanten Verzerrungen führen, die in die Fehlermatrix eingehen und die Genauigkeit über- oder unterschätzen. Es erscheint durchaus verlockend, dieselben Pixel, die bereits bei der Klassifizierung verwendet wurden, wieder zu nutzen. Daraus ergeben sich allerdings verzerrte

Ergebnisse, die Genauigkeiten vortäuschen, die in der Regel keine volle Entsprechung im Gesamtergebnis der Klassifizierung finden, da diese Pixel Grundlage und Eingangsgröße der Klassifizierung sind. Umso interessanter wäre die Quantifizierung des durch Verzerrung (*Bias*) entstandenen Fehlers. Deshalb wird anhand verschiedener Konstellationen von Referenzdaten untersucht, ob relevante Aussagen zum Bias getroffen werden können (siehe Kapitel 6.3).

Die Zufallsauswahl ist eine Möglichkeit zur Erhebung von Stichproben. Werden zufällig über das gesamte Bild verteilte Pixel (*simple random sampling*) mit Referenzdaten verglichen, können dadurch Korrelationen zu naheliegenden, benachbarten Pixeln vermieden werden. Ein Nachteil dieser einfachen uneingeschränkten Zufallsauswahl ist deren Flächenwichtung. Das heißt, große Klassen neigen dazu, von einer größeren Anzahl von Referenzpixeln abgedeckt zu sein als kleinere Klassen. Sehr kleine, aber für die Klassifizierung möglicherweise bedeutende Klassen könnten durchaus gar nicht abgedeckt sein. Aus den genannten Gründen ist deshalb die stratifizierte Zufallsauswahl (*stratified random sampling*) ein verbreitetes Verfahren zur Erfassung von Referenzdaten. Der erste Schritt ist die Einteilung des Bildes in Straten. Diese sollten in sich homogen sein und einen signifikanten Unterschied zu den anderen Straten aufweisen. Die Bezeichnung *Stratum* kann sich auf räumliche Einheiten, wie z.B. Bestandesgrenzen, Objeklassengrenzen der Klassifizierung oder andere Merkmale, wie Baumarten oder Waldeigentümer beziehen. Anschließend wird in jedem einzelnen Stratum das zufällige Sampling durchgeführt. Sowohl beim *simple random sampling* als auch beim *stratified random sampling* kann es aufgrund der zufälligen Verteilung der Stichprobenpunkte am Boden schwierig werden, überhaupt zugängliche Punkte zu finden. Beim *stratified random sampling* muss für die Verteilung der Referenzpixel die Stratifizierung bekannt sein. Das heißt, dass die Aufnahme der Referenzdaten erst nach durchgeführter Klassifizierung erfolgen kann.

Im Gegensatz zur Zufallsauswahl folgen die systematischen Stichprobenverfahren einem starren, festgelegten Muster. An dieser Stelle sollen die der Arbeit zugrunde liegenden Daten der Bundeswaldinventur als ein Beispiel der systematischen Stichprobenerhebung näher betrachtet werden. Die Bundeswaldinventur erfasst die Waldbestände Deutschlands nach dem Prinzip der Clusterstichprobe. Die einzelnen Aufnahmeeinheiten (*Cluster*) sind in einem Grundnetz von 4 km x 4 km über das gesamte Land verteilt. Ein Cluster besteht aus vier Traktecken, welche die Eckpunkte des Traktes, eines Quadrates mit 150 m Seitenlänge, sind. Einerseits ergeben sich aus diesem Verfahren Vorteile, wie die Nachvollziehbarkeit und einfache Durchführung der Stichprobenauswahl, die gleichmäßige Abdeckung des Untersuchungsgebietes; andererseits aber auch Nachteile, denn die Ergebnisse sind oft nicht tendenzfrei, Mittelwert und Varianz können nicht unmittelbar berechnet werden.

Eine sinnvolle Alternative ist die Kombination aus systematischer und zufälliger Stichprobenerhebung. Bei der systematischen Auswahl können Trainings- und Referenzdaten gleichzeitig aufgenommen werden. Zur Vermeidung von Autokorrelationen und zeitlichen Abhängigkeiten bei der Datenaufnahme wird die zufällige Auswahl nach erfolgter Klassifizierung durchgeführt.

**Stichprobenumfang der Referenzdaten:** Weil die Aufnahme von Referenzdaten einerseits ein

erheblicher Zeit- und Kostenfaktor und andererseits der Kernpunkt der Auswertung von Fernerkundungsdaten ist, wird dieser Thematik breites Interesse von wissenschaftlicher Seite entgegengebracht. Die aufzunehmenden Referenzdaten sollten auf ein akzeptables Minimum beschränkt werden, wobei die statistische Sicherheit gewährleistet sein muss. Oft wird die Menge der Referenzdaten durch praktische Gegebenheiten bestimmt.

Gleichungen zur Berechnung des Stichprobenumfangs, ausgehend von einer binomialen Verteilung, basieren vorwiegend auf dem Verhältnis korrekt klassifizierter Daten und zulässigem Fehler. CONGALTON (1991) gibt als Erfahrungswert mindestens 50 Punkte für jede Vegetations- oder Landnutzungskategorie an. Bei sehr großen Flächen (größer als 4000 km<sup>2</sup>) oder vielen Vegetations- oder Landnutzungsklassen (mehr als 12) sollte die Anzahl auf 75-100 Punkte pro Objektklasse steigen. Der Stichprobenumfang kann auch an die relative Bedeutung der Kategorie innerhalb der klassifizierten Objekte oder der Variabilität der Objektklasse angepasst werden.

VAN GENDEREN ET AL. (1978) bestimmte die minimale Referenzpixelanzahl nach folgendem Ansatz: Bei einer zu kleinen Verifizierungsmenge besteht die Möglichkeit, dass alle Pixel korrekt erkannt werden, was jedoch nicht der Realität entspricht. Er errechnete eine Mindestanzahl von Referenzpixeln, die für eine bestimmte Genauigkeit erforderlich sind. Nähert sich die Genauigkeit 100%, wird die so berechnete Anzahl von Referenzpixeln sehr groß. Tabelle 5.8 zeigt Ergebnisse der Arbeit von VAN GENDEREN ET AL. (1978).

Klassifikationsgenauigkeit	Stichprobenumfang
0,95	60
0,90	30
0,85	20
0,80	15
0,60	10
0,50	5

**Tabelle 5.8:** Minimaler Stichprobenumfang pro Klasse (nach VAN GENDEREN ET AL. (1978))

#### 5.6.4 Bewertung der Genauigkeitsanalyse

Wenn die Genauigkeit einer Klassifizierung bestimmt ist, kann das Vertrauensintervall für die Genauigkeiten der Objektklassen berechnet werden. Zur Errechnung des Vertrauensintervalls muss dessen Güte angegeben werden, z.B. 95%. Anschließend kann das Intervall basierend auf folgender Formel (FREUND (1992)) berechnet werden.

$$p \left\{ -z_{\alpha/2} < \frac{x - n\theta}{\sqrt{n\theta(1-\theta)}} < z_{\alpha/2} \right\} = 1 - \alpha \quad (5.7)$$

mit

---

$p$	=	Wahrscheinlichkeit
$n$	=	Stichprobenumfang
$x$	=	Anzahl der richtig zugeordneten Pixel in der Stichprobe
$\theta$	=	Klassifizierungsgenauigkeit, vorläufig nach $x/n$ geschätzt
$z_{\alpha/2}$	=	Wert der Standard-Normalverteilung
$\alpha$	=	Irrtumswahrscheinlichkeit

Bei einer großen Anzahl von Stichprobenelementen (30 oder mehr) wird die binomiale Verteilung adäquat durch die Normalverteilung approximiert, so dass Gleichung 5.7 angewendet werden kann (vgl. FREUND (1992)). Die nach genannter Gleichung berechneten Grenzen für die Gesamtgenauigkeit der adaptierten Waldmaske des Untersuchungsgebietes Sachsen sind:

$$0.9458 < \theta < 0.9623$$

für  $\alpha = 5\%$ , mit  $x = 2342$ ,  $n = 2453$ . Die Schätzung für  $\theta$  ist  $\bar{x} = x/n = 0.9547$ . Die zuvor berechneten Grenzen für  $\theta$  zeigen, dass der geschätzte Wert für  $\theta$  mit einem Vertrauensniveau von 95% im Intervall liegt.

### 5.6.5 Einfluss der Referenzdaten

In der operationalen Anwendung ist die zusätzliche Erhebung von Referenzdaten aufgrund von Kosten- und Zeitaspekten nicht realisierbar. Deshalb wurden die systematisch erhobenen BWI-Daten als Referenz verwendet, da kein anderes Datenset flächendeckend für alle Untersuchungsgebiete verfügbar war. Zu erwähnen ist in diesem Zusammenhang auch, dass der Verwendung der BWI-Traktecken die BWI-Walddefinition zugrunde liegt. Daraus resultiert, dass diese Daten diejenigen sind, die dem Untersuchungsobjekt, nämlich dem BWI-Wald, am nächsten kommen. Dies bedeutet, dass beispielsweise Bäume in Parkanlagen und Wohngebieten nicht zum Wald gezählt werden.

Ein Aspekt, der an dieser Stelle nochmals in Erinnerung gerufen werden soll, ist die Genauigkeit der Referenzdaten. Letztlich spiegelt die Genauigkeitsangabe einer Klassifizierung die Übereinstimmung mit den Referenzdaten wieder, das heißt, auch die Übereinstimmung mit den Fehlern der Referenzdaten. Wenn also die Referenzdaten die Realität nur ungenau wiedergeben, dann ist selbst eine 100% genaue Klassifizierung nur eine ungenaue Darstellung der Realität. Hinzu kommt, dass die Genauigkeit der Referenzdaten nur selten angegeben oder gar quantifiziert ist.

Eine weitere mögliche Fehlerquelle bei der Verifizierung sind Lageungenauigkeiten. Wie bereits in Kapitel 4.1 beschrieben, weisen die Satellitendaten variable Lageungenauigkeiten von maximal 75 m auf. Andererseits ist auch eine Lageungenauigkeit der BWI-Daten nicht auszuschließen. Der Einfluss geometrischer Fehler zeigte sich bei der Einteilung der BWI-Referenzdaten in

sichere und unsichere Trakte (siehe Kapitel 6.5.1). Der durch die Lageungenauigkeit induzierte Fehler wird bei den sicheren Referenzpunkten verschwindend gering, da bei diesen die gesamte Umgebung des Punktes derselben Kategorie angehört. Ebenso werden dadurch „Randeffekte“ minimiert, wie beispielsweise Traktecken, die an Waldaußenrändern liegen, da diese der unsicheren Klasse zugewiesen wurden. Wird die Genauigkeit, die aufgrund der sicheren Referenzdaten errechnet wurde, mit der „unsicheren Genauigkeit“ verglichen, so zeigt sich eine deutliche Differenz (siehe Kapitel 6.5.1).

Im Gegensatz zur Verifizierung mit über Stichprobenverfahren erhobenen Punktdaten führt der Vergleich mit flächendeckenden Daten zu einer anderen Qualität der Genauigkeitsanalyse (siehe Kapitel 6.5.1). Die Verifizierung wird hier auf der gesamten Fläche durchgeführt. Die solcherart ermittelte Genauigkeit ist exakt, allerdings haben auch diese Referenzdaten eine implizite Ungenauigkeit, die es zu bedenken gilt.

### **5.6.6 Untersuchung des Einflusses abhängiger Referenzdaten**

Wenn Referenzdaten sowohl zur Signaturerstellung als auch zur Verifizierung verwendet werden, kann dies zu einer Überschätzung der Genauigkeit führen. Um diesen Effekt zu evaluieren, wurden die vorhandenen BWI-Daten in disjunkte Teilmengen nach dem Prinzip zufälliger Unterstichproben auf Elementebene aufgeteilt. Dabei diente eine Teilmenge der Signaturerstellung der Waldmaske, die andere wurde zur Verifizierung genutzt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Kapitel 6.3 dargelegt.

## 6 Ergebnisse

### 6.1 Topographische Normalisierung

Für die Bewertung der C-Faktor-Korrekturmethode wurden verschiedene Subsets des Untersuchungsgebietes Sachsen ausgewählt. Als schwierig erwies sich die Wahl der Trainingsgebiete, denn die Referenzflächen sollten möglichst nach den in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Kriterien ausgewählt werden, z.B. Fichtenflächen einer bestimmten Altersklasse. Eine erste Normalisierung, basierend auf Trainingsgebieten des Gesamtwaldes, lieferte bei der nachfolgenden Waldmaskenerstellung um 4 % schlechtere Klassifikationsergebnisse. Diese können auf die unstratifizierte Auswahl der Trainingsgebiete zurückgeführt werden, denn bereits Laub- und Nadelwald haben sehr verschiedene Reflexionscharakteristiken, die getrennte Regressionsanalysen erfordern.

Unter den gegebenen Voraussetzungen erscheint eine topographische Normalisierung über Nadelwald-Trainingsgebiete als die erfolgversprechendere Variante für größere Untersuchungsgebiete. Nadelwald weist im Gegensatz zum Laubwald eine geringere Reflexionsdynamik und klarere Abtrennung zu anderen Objektklassen auf und deckt zudem einen Teil des Laubwaldspektrums ab. Unter Zuhilfenahme der Orthofotos, der terrestrischen BWI-Daten und ATKIS-Karten wurden im Satellitenbild Trainingsgebiete von Nadelwaldflächen verschiedener Beleuchtungsverhältnisse ausgewählt. Damit standen 2068 Pixel zur Ermittlung des Korrekturfaktors  $c$  zur Verfügung. Die stärksten Abhängigkeiten zwischen Beleuchtung und Spektralwerten waren im Bereich des nahen und mittleren Infrarot zu verzeichnen.

ETM-Kanal	b (Interzept)	m (Anstieg)	Korrekturfaktor c ( $c = b/m$ )	Pearsons Korrelationskoeffizient (r)
2	27,25	5,48	4,97	0,24
3	20,29	3,91	5,19	0,16
4	14,25	35,45	0,40	0,29
5	4,25	19,76	0,21	0,25
7	5,40	8,15	0,66	0,23

**Tabelle 6.1:** Parameter der linearen Regression zwischen den spektralen Werten  $L$  und dem lokalen Sonneneinfallswinkel  $\cos(i)$  für die Landsat 7-Daten (Subset aus UG Sachsen) ( $L = b + m \cdot \cos(i)$ )

Jedoch sind die für die Regression errechneten Korrelationskoeffizienten  $r$  nicht zufriedenstellend (in allen Kanälen kleiner als 0,3). Dies kann wiederum auf die nicht ausreichend präzise Trainingsgebietswahl zurückgeführt werden, die mit dem vorhandenen Datenmaterial nicht besser möglich war. Aufgrund des sehr aufwendigen Korrekturverfahrens, der beschriebenen Datenlage und der daraus erzielten Ergebnisse wurde im Weiteren auf eine topographische Korrektur der Szenen verzichtet.

Voraussetzung für eine sinnvolle Normalisierung ist ein den Daten angepasstes Höhenmodell, dessen räumliche Auflösung viermal höher als die der zu korrigierenden Daten sein sollte (EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE GENERAL XII, SCIENCE, RESEARCH AND DEVELOPMENT (2000)). Bei den Landsat-Szenen entspricht dies einer Gitterweite von weniger als 10 m, bei QuickBird-Daten von weniger als 1 m. Für große Gebiete sind Höhenmodelle in den genannten Auflösungen nicht verfügbar.

Eine weitere Fehlerquelle sind geometrische Ungenauigkeiten zwischen Satellitendaten und DGM. Schon geringe Lageabweichungen zwischen Höhenmodell und Satellitenszene und somit den überbeleuchteten und schattigen Regionen zerstören den direkten Zusammenhang zur Topographie. Wie sich gezeigt hat, ist die Wahl der Trainingsgebiete eine entscheidende Einflussgröße der Beleuchtungskorrektur. In Waldregionen sind für diese Aufgabe Zusatzinformationen, beispielsweise Baumartenkarten, unabdingbar. Sinnvoll wäre bei entsprechender Datenlage eine Stratifizierung des Untersuchungsgebietes nach verschiedenen Neigungswinkeln und Höhenstufen in Kombination mit Baumarten bzw. ähnlich reflektierenden Baumartengruppen. Auf diese Art wären die wichtigsten Einflussgrößen in ein Korrekturverfahren integriert.

## 6.2 Fusion von Satellitendaten

Der Adaptive Image Fusion-Algorithmus wurde für die Landsat 7-Daten der Untersuchungsgebiete Nordostdeutschland und Sachsen angewendet. Ein wichtiger Aspekt nach der Durchführung einer Fusion unterschiedlich aufgelöster Daten ist deren Qualitätseinschätzung. Eine erste Beurteilung des Fusionsproduktes kann visuell erfolgen, wobei damit keine gesicherte Aussage getroffen werden kann, da das menschliche Sehvermögen verschiedene Arten spektraler Verzerrungen nicht äquivalent wahrnehmen kann (WALD ET AL. (1997)). Zuverlässige Kriterien zur Beurteilung der Qualität synthetischer Daten sind unter anderem statistische Kenngrößen. Ein Vergleich zwischen Standardabweichung ( $\sigma$ ) und mittlerem Grauwert ( $\mu$ ) des Original- und Fusionsbildes zeigt, dass keine signifikanten Abweichungen vorliegen (Tabelle 6.2). Die Standardabweichung des Adaptive Image Fusion-Bildes (AIF) ist etwas gesunken, was auf die Mittelung der Spektralwerte während der Fusion zurückzuführen ist. Demzufolge kann also davon ausgegangen werden, dass die Schwellenwerte der einzelnen Objektklassen der unfusionierten Multispektraldaten ebenso für die fusionierten Daten verwendet werden können.

Eine Überprüfung der Klassifikationsergebnisse im Vergleich zum Orthofoto hat ergeben, dass es keine spezielle „Fehlergruppe“ gibt, in der sich die Fehlklassifizierungen häufen. Zur selben Aussage führten Kontrollen mit terrestrischen Daten, bei denen keine Objektklasse auffallend fehlerhaft war. Als ebenso unwahrscheinlich stellte sich der Verdacht heraus, dass die nicht durchgeführte Topographische Normalisierung eine deutliche Verbesserung der Genauigkeiten verhindert hat, denn sowohl im Flachland als auch im Gebirge liegen die Fehlzugeweisungen des Waldes bzw. des Nichterkennens von Wald im gleichen Rahmen. Eine weitere Überprüfung zeigte, dass die Waldgrenzen des AIF-Bildes nicht mehr den extremen „Stufeneffekt“ der ehemals 25 m-Pixel haben. Stattdessen waren verwischte bzw. geglättete Grenzen sichtbar, die mitunter an anderen Stellen als in den Ausgangsdaten zu finden waren. Diese Unstimmigkei-

Kanal	mittlerer Grauwert und Standardabweichung	Originalbild	AIF
2	$\mu$	54,018	53,954
	$\sigma$	10,547	9,857
3	$\mu$	47,947	47,863
	$\sigma$	18,289	16,875
4	$\mu$	62,064	62,106
	$\sigma$	19,681	18,685
5	$\mu$	73,241	73,209
	$\sigma$	31,31	29,531
7	$\mu$	44,799	44,717
	$\sigma$	27,122	24,993

**Tabelle 6.2:** Vergleich zwischen Original- und Fusionsbild anhand statistischer Kenngrößen (östliche Szene des UG Nordostdeutschland, Landsat 7, AIF-Parameter: 7 Iterationen, Filtergröße 13 \* 13)

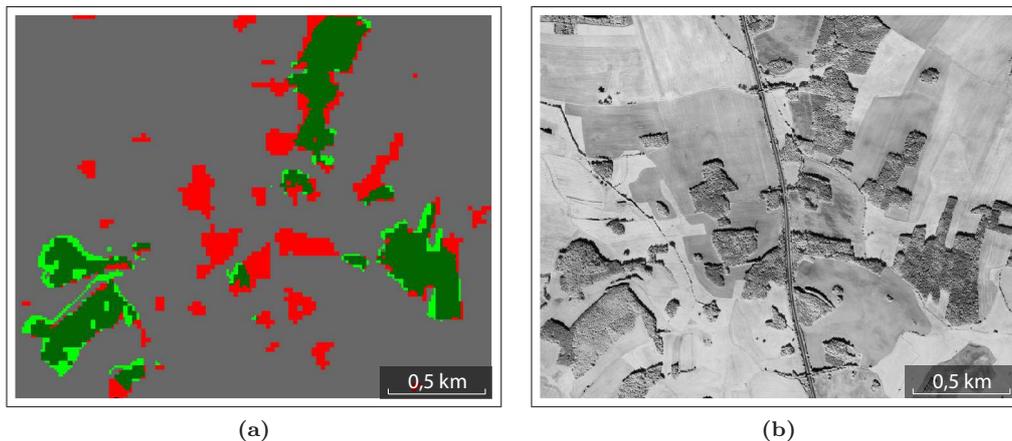
ten verdeutlichen, dass es zwischen den multispektralen und panchromatischen Landsat-Daten Lageungenauigkeiten gibt, die die Vorteile der AIF-Fusion reduzieren. Sie führen unter anderem dazu, dass die „scharfen Grenzen“ des Pan-Kanals nicht mit den Informationen des multispektralen Bildes übereinstimmen und gegebenenfalls sogar zur Bildung neuer Objektklassen führen können.

Die vergleichenden Betrachtungen führten zu dem Ergebnis, dass die neu erkannten Waldflächen und die Fehlzuweisungen der AIF-Fusionsbilder in derselben Größenordnung liegen. Es ist keine eindeutige Tendenz zu einer gravierenden Verbesserung oder Verschlechterung der Genauigkeiten der Klassifikationsergebnisse festzustellen (siehe Tabelle 6.3 und Abb. 6.1). Teilweise waren kleine Waldflächen nach dem Filterprozess nicht mehr auffindbar. Dieser Verlust von Objekten ist auf den Informationsgehalt der panchromatischen Daten zurückzuführen. Sind in diesen Daten keine Strukturen differenzierbar, obwohl sie im multispektralen Bild zu erkennen sind, werden keine Objektgrenzen eingeführt, sondern die multispektralen Werte werden gemittelt und in einem anderen Objekt integriert. Umgekehrt war zu beobachten, dass kleinere Blößen oder lichte Flächen, die nicht zum Wald gehören, aufgrund fehlender Details im Pan-Kanal gemittelt und Waldflächen zugewiesen wurden.

	Holzboden (AIF-WM)	Nichtwald (AIF-WM)	Gesamtgenauigkeit	Kappa-Koeffizient	Holzboden (WM)	Nichtwald (WM)	Gesamtgenauigkeit	Kappa-Koeffizient
<b>Wald (Referenz)</b>	1293	130	94,20%	0,87	1322	101	94,68%	0,88
<b>Nichtwald (Referenz)</b>	115	2688			124	2679		

**Tabelle 6.3:** Genauigkeitsvergleich zwischen fusionierter (links) und unfusionierter Holzbodenmaske (östliche Szene des UG Nordostdeutschland, Landsat 7)

Sobald der Laubwald als eigenes Stratum ausgewiesen wird, werden die Genauigkeiten der somit erzielten Waldmasken bedeutend schlechter. Ursache dafür ist, dass sich die Signaturen



**Abbildung 6.1:** Differenzen der Klassifizierungsergebnisse basierend auf AIF-Bild und unfusionierten Landsat 7-Daten (UG Sachsen) (a): grau - übereinstimmende Nichtwalderkennung, hellgrün - Wald AIF, rot - Nichtwald AIF, dunkelgrün - übereinstimmende Walderkennung, Orthofotoauschnitt (b)

des Laubwaldes basierend auf den AIF-Daten stark verändert haben. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich in den panchromatischen Daten keine Trennung zwischen Laub- und Nadelwald feststellen lässt. Dadurch bewirkt die Fusion keine Schärfung der Kanten zwischen den beiden Waldtypen sondern das Gegenteil: die Kanten werden geglättet.

Aufgrund der mit dem AIF-Verfahren erzielten Ergebnisse wurde auf eine Fusion der Landsat-Daten verzichtet.

### 6.3 Einfluss abhängiger Referenzdaten

Die Zielstellung dieser Untersuchung war die Beurteilung der Überschätzung der Genauigkeit durch die Verwendung von Referenzdaten, die sowohl zur Signaturerstellung als auch zur Verifizierung eingesetzt werden. Dazu wurden die vorhandenen BWI-Daten zufällig in zwei Untermengen variierender Größe unterteilt. Eine der beiden Mengen wurde dann zur Signaturerstellung benutzt, während die andere nur zur Verifizierung der Waldmaske diente. Dadurch war sichergestellt, dass Signaturstellungsdaten und Verifizierungspunkte voneinander unabhängig sind und dass derselbe Referenzpunkt nicht für zwei verschiedene Aufgabenstellungen eingesetzt wird. Die zufällige Zuweisung der Referenzpunkte nach den jeweiligen prozentualen Aufteilungen in die beiden Untermengen wurde mehrmals wiederholt. Die dabei ermittelten Ergebnisse sind in Tabelle 6.4 zusammengefasst.

Die mit einem Anteil von 50 % der Referenzpunkte errechneten Genauigkeiten liegen 0,27 % bis 0,82 % unterhalb der Gesamtgenauigkeit von 94,78 % der entsprechenden Holzbodenmaske des UG Sachsen, die folglich leicht überschätzt wird. Allerdings führt die geringere Zahl an Punkten für die Signaturerstellung zu einer schlechteren Abbildung der Varianz der Wald bzw. Nichtwaldpunkte und damit von vornherein zu einer schlechteren Waldmaske.

Ausgehend von der Überlegung, dass zur Verifizierung durchaus weniger Punkte ausreichen (siehe Kapitel 5.6.3), wurden schrittweise mehr Punkte zur Signaturerstellung herangezogen (60 %, 70 %, 80 % und 98 % der insgesamt 2.453 Referenzpunkte). Dabei hat sich gezeigt, dass die Zuverlässigkeit der Verifizierung mit geringer werdender Anzahl von Verifizierungspunkten stetig abnimmt. Dies wird anhand der größeren Streuung der Genauigkeiten ab einer Aufteilung der Referenzdatenmenge von 60 % zu 40 % ersichtlich. Die maximalen Differenzen der Gesamtgenauigkeiten innerhalb der nach gleichen prozentualen Anteilen aufgeteilten Referenzdaten schwanken von 1,35 % bis 7,69 %. Eine dementsprechend ähnliche Entwicklung zeichnet sich beim Vergleich aller Gesamtgenauigkeiten zur Holzbodenmaske des UG Sachsen mit 94,78 % ab. Diese streuen bis zu 5,22 % um die genannten 94,78 %.

Wird der Stichprobenumfang der Referenzdaten zur Verifizierung extrem klein (z.B. 2 %), ist die damit verbundene Aussage hinfällig, da die Stichprobe die Grundgesamtheit nicht adäquat abbilden kann.

Punkte zur Signaturerstellung		Punkte zur Verifizierung		Gesamt- genauigkeit	maximale Differenz zwischen Gesamt- genauigkeiten	Genauigkeits- differenz ggü. Holzbodenmaske
Anteil	Anzahl	Anteil	Anzahl			
50%	1226	50%	1226	93,96%		-0,82%
50%	1226	50%	1226	93,97%	0,55%	-0,81%
50%	1226	50%	1226	94,51%		-0,27%
60%	1471	40%	982	94,91%		0,13%
60%	1471	40%	982	93,56%	1,35%	-1,22%
60%	1471	40%	982	94,20%		-0,58%
70%	1717	30%	736	94,03%		-0,75%
70%	1717	30%	736	93,46%	1,24%	-1,32%
70%	1717	30%	736	94,70%		-0,08%
80%	1962	20%	491	95,33%		0,55%
80%	1962	20%	491	96,11%	4,05%	1,33%
80%	1962	20%	491	92,06%		-2,72%
98%	2403	2%	50	100,00%		5,22%
98%	2403	2%	50	92,31%	7,69%	-2,47%
98%	2403	2%	50	94,23%		-0,55%

**Tabelle 6.4:** Untersuchung zum Bias von Referenzdaten für UG Sachsen

Wie aus den Ergebnissen der maximalen Differenz zwischen den Gesamtgenauigkeiten hervorgeht, verändert bereits die Auswahl der Punkte die Gesamtgenauigkeiten. Das heißt, dass selbst bei einer strikten Aufteilung von Referenzdaten in zwei unabhängige Punktmengen methodische Fehler nicht ausgeschlossen werden können. Aufgrund dieses zufälligen methodischen Einflusses entsteht eine Verzerrung der Ergebnisse. Die Beantwortung der Frage nach der optimalen Anzahl der Punktmenge zur Signaturerstellung und zur Verifizierung steht im Kontext zur Trennbarkeit der untersuchten Objekte und damit zur Variabilität der Waldverteilung.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die untersuchte Überschätzung der Gesamtgenauigkeit durch Verwendung der BWI-Daten sowohl zur Signaturerstellung als auch zur Verifizierung unter 1,4 % liegt, ausgehend von einer maximalen Aufteilung von 70 % der Referenzpunkte zur Signaturerstellung. Für die Gewährleistung der bestmöglichen Qualität der Waldmaske soll-

ten alle BWI-Punkte für die Waldmaskenerstellung benutzt werden, gegebenenfalls können im Bedarfsfall zusätzliche Daten für die Verifizierung erhoben werden.

## 6.4 Schwellenwertverfahren

### 6.4.1 Spektralwertextraktionen der Landsat-Daten

Der Einfluss der Spektralwertextraktion über ein Pixel oder 3x3 Pixel auf die Waldmaskenerstellung mit Landsat-Daten wurde an den Untersuchungsgebieten Sachsen und Pfälzerwald evaluiert. Für die 3x3-Pixelumgebung wurden sowohl der Mittelwert (Mean) als auch der Median gebildet. Die Validierung der aus den unterschiedlichen Signaturerhebungsverfahren resultierenden Waldmasken hat gezeigt, dass die Genauigkeiten der Holzboden- bzw. Waldmasken in gleicher Größenordnung liegen (Tabellen 6.5 bis 6.8). Mean und Median reduzieren die Varianz innerhalb der Satellitenszene und tragen damit nicht zur Erhöhung der Trennschärfe zwischen Wald und Nichtwald bei. Tendenziell werden die Abweichungen durch die Adaption an die BWI-Walddefinition reduziert (Tabellen 6.5 und 6.6).

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient	Verfahren zur Waldmasken- erstellung
Wald (Referenz)	645	52	92,54%	89,96%	94,94%	0,88	Ein-Pixel
Nichtwald (Referenz)	72	1684	95,90%	97,00%			
Wald (Referenz)	623	74	89,38%	92,99%	95,07%	0,88	Mean
Nichtwald (Referenz)	47	1709	97,32%	95,85%			
Wald (Referenz)	625	72	89,67%	93,01%	95,15%	0,88	Median
Nichtwald (Referenz)	47	1709	97,32%	95,96%			

**Tabelle 6.5:** Verifizierungsergebnisse der Ein-Pixel-, Mean- und Median-Holzbodenmasken (UG Sachsen, Landsat 7)

Während die Gesamtgenauigkeiten der Masken mit einer maximalen Differenz von 0,2% sehr ähnlich sind, fallen die Fehlzusweisungen in den Klassen Holzboden bzw. Wald und Nichtwald unterschiedlich aus. Im Gegensatz zur Ein-Pixel-Signaturerhebung ist die Anzahl der Fehler 2. Art (Nichtwald wird nicht korrekt erkannt) der Waldmasken Mean und Median geringer. Dies wird insbesondere an Waldaußenrändern sichtbar, an denen Fehlzusweisungen im Gegensatz zur Ein-Pixel-Maske reduziert werden. Die Walderkennung hingegen fällt schlechter aus, d. h. die Anzahl der Fehler 1. Art ist bei den Masken Mean und Median höher. Teilweise sind Fehlklassifizierungen detektierbar. Diese Aussagen werden sowohl durch visuelle Auswertungen mit Orthofotos als auch Genauigkeitsanalysen mit BWI-Referenzpunkten bestätigt. In den Abbildungen 6.2 und 6.3 sind an Beispielen von Landsat 7-Differenzbildern Unterschiede zwi-

	Wald (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient	Verfahren zur Waldmasken- erstellung
Wald (Referenz)	648	49	92,97%	91,27%	95,47%	0,89	Ein-Pixel
Nichtwald (Referenz)	62	1694	96,47%	97,19%			
Wald (Referenz)	628	69	90,10%	94,29%	95,64%	0,89	Median
Nichtwald (Referenz)	38	1718	97,84%	96,14%			

Tabelle 6.6: Verifizierungsergebnisse der Ein-Pixel- und Median-Waldmasken (UG Sachsen, Landsat 7)

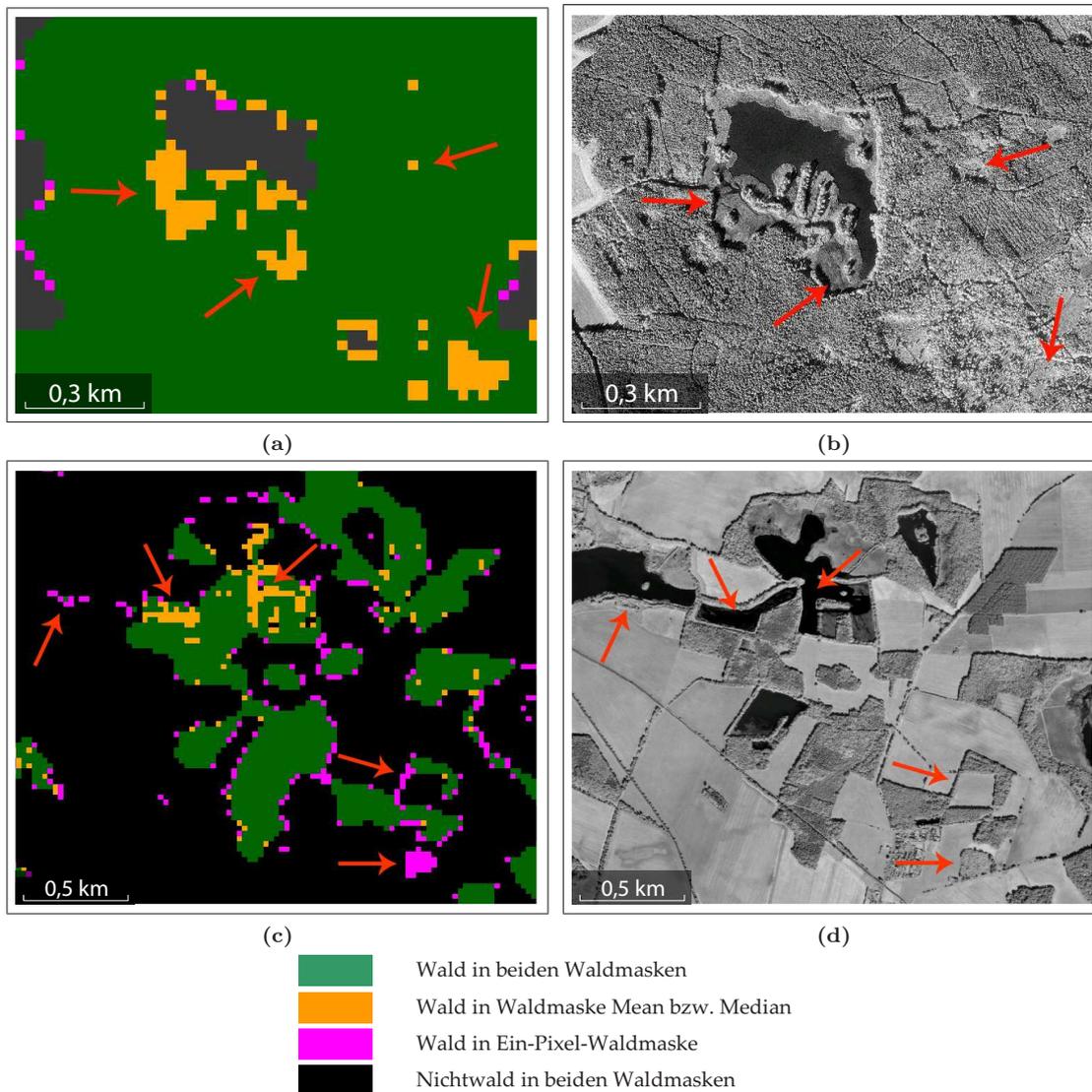
	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient	Verfahren zur Waldmasken- erstellung
Wald (Referenz)	1808	101	94,71%	95,66%	94,83%	0,90	Mean
Nichtwald (Referenz)	82	1549	94,97%	93,88%			
Wald (Referenz)	1849	60	96,86%	93,95%	94,94%	0,90	Median
Nichtwald (Referenz)	119	1512	92,70%	96,18%			
Wald (Referenz)	1852	57	97,01%	93,87%	94,97%	0,90	Ein-Pixel
Nichtwald (Referenz)	121	1510	92,58%	96,36%			

Tabelle 6.7: Verifizierungsergebnisse der Ein-Pixel-, Mean- und Median-Holzbodenmasken (UG Pfälzerwald, Landsat 7)

schen der Ein-Pixel-Waldmaske und der Waldmaske Mean (a) bzw. der Waldmaske Median (c) abgebildet. Im Orthofoto (b und d) sind die realen Landnutzungsformen dargestellt.

	Wald (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient	Verfahren zur Waldmasken- erstellung
Wald (Referenz)	1852	57	97,01%	94,15%	95,14%	0,90	Median
Nichtwald (Referenz)	115	1516	92,95%	96,38%			
Wald (Referenz)	1854	55	97,12%	94,11%	95,17%	0,90	Ein-Pixel
Nichtwald (Referenz)	116	1515	92,89%	96,50%			

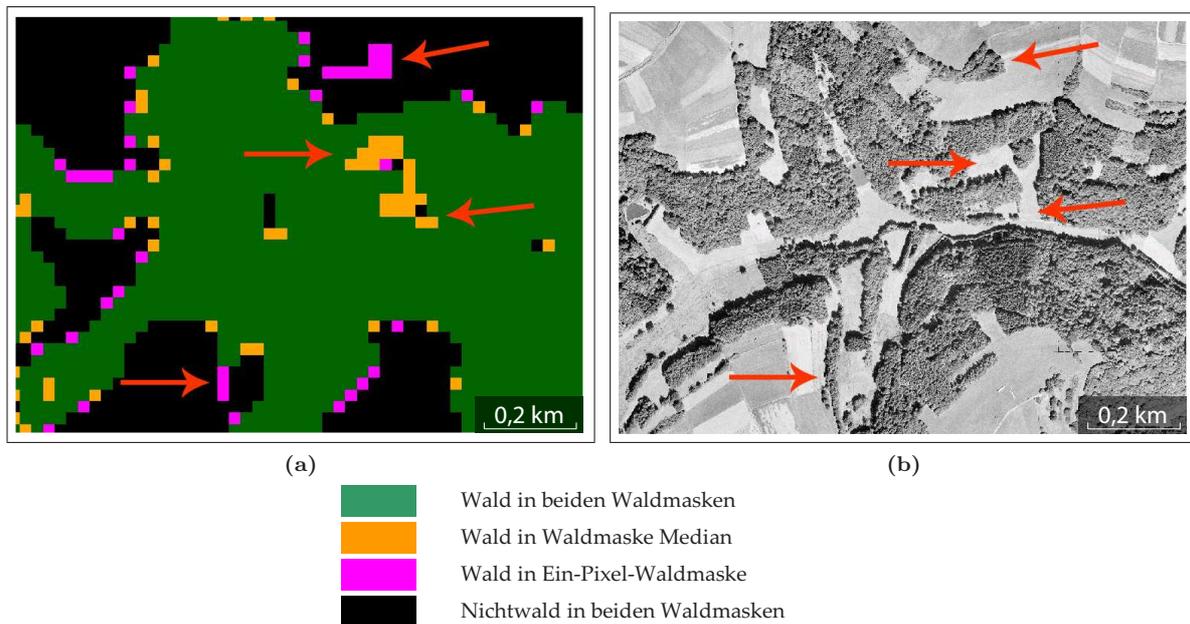
Tabelle 6.8: Verifizierungsergebnisse der Ein-Pixel- und Median-Waldmasken (UG Pfälzerwald, Landsat 7)



**Abbildung 6.2:** Unterschiedliche Walderkennung der Signaturerhebung über 1 Pixel oder 3 x 3 Pixel (Mean - a, Median - c) an zwei verschiedenen Gebieten: Vergleich Differenzbild Waldmaske (a, c) - Orthofoto (b, d), UG Sachsen

Als weiteres Ergebnis geht aus den Untersuchungen hervor, dass die Waldflächen der Mean- und Median-Masken kleiner als die der Ein-Pixel-Masken sind. Dies kann auf die glättende Filterwirkung von Mittelwert und Median zurückgeführt werden, durch die kleine Waldflächen ausserhalb des Waldes nicht erkannt und als Nichtwald klassifiziert werden. Andererseits gehen zwar auch kleine Nichtwaldflächen in Waldgebieten verloren und werden als Wald ausgewiesen, jedoch in geringerem Umfang als dass Wald nicht erkannt wird. Die Ein-Pixel-Waldmaske weist eine um 7.329 ha größere Waldfläche als die Median-Maske aus, was auf die geringere Anzahl der Fehler 1. Art zurückzuführen ist (Tabelle 6.9).

Wie aus den Tabellen 6.5 bis 6.8 hervorgeht, sind keine eindeutigen Tendenzen zu erkennen,



**Abbildung 6.3:** Unterschiede der Walderkennung, die aus der Signaturerhebung über 1 Pixel oder 3 x 3 Pixel (Median) resultieren, Differenzbild Waldmaske (a) - Orthofoto (b), UG Pfälzerwald

Waldmaske	Bezugsgröße	Fläche in ha
Median	Pixel	133.646
Ein-Pixel	Pixel	140.975
BWI-Wald	BWI-Traktecke	147.789

**Tabelle 6.9:** Waldflächenerkennung durch Median- bzw. Ein-Pixel-Signaturerhebung im Vergleich zur BWI (UG Sachsen, Landsat 7)

welches der Signaturerhebungsverfahren die genauere Waldmaske liefert. Allerdings zeigte die Ein-Pixel-Waldmaske bessere Ergebnisse hinsichtlich der korrekten Walderkennung, da eine geringere Anzahl von Fehlern erster Art ausgewiesen wurde. Letztlich wurde zur Extraktion der Spektralwerte die Ein-Pixel-Methode eingesetzt, da nach den oben beschriebenen Ergebnissen auf diese Art und Weise die besseren Waldmasken zu erwarten sind.

#### 6.4.2 Spektralwertextraktionen der QuickBird-Daten

Ein anderes Bild ergeben die mittels verschiedener Filteroperationen entstandenen QuickBird-Waldmasken des UG Pfälzerwald. Zwischen den Mean- und Median-Waldmasken treten nur minimale Genauigkeitsdifferenzen auf (Tabelle 6.10). Da die Median-Maske stets gleiche oder bessere Gesamtgenauigkeiten liefert, wurden nachfolgende Auswertungen mit diesen Waldmas-

ken durchgeführt.

Verfahren zur Waldmaskenerstellung	Gesamtgenauigkeit	Holzbodenerkennung mit PanQB-Referenzpunkten		Nichtwalderkennung mit PanQB-Referenzpunkten	
		korrekt	nicht korrekt	korrekt	nicht korrekt
Mean 5 x 5	97,79%	324	3	251	10
Median 5 x 5	97,79%	324	3	251	10
Mean 7 x 7	97,11%	322	5	249	12
Median 7 x 7	97,62%	321	6	253	8
Mean 9 x 9	96,94%	322	5	248	13
Median 9 x 9	97,11%	323	4	248	13

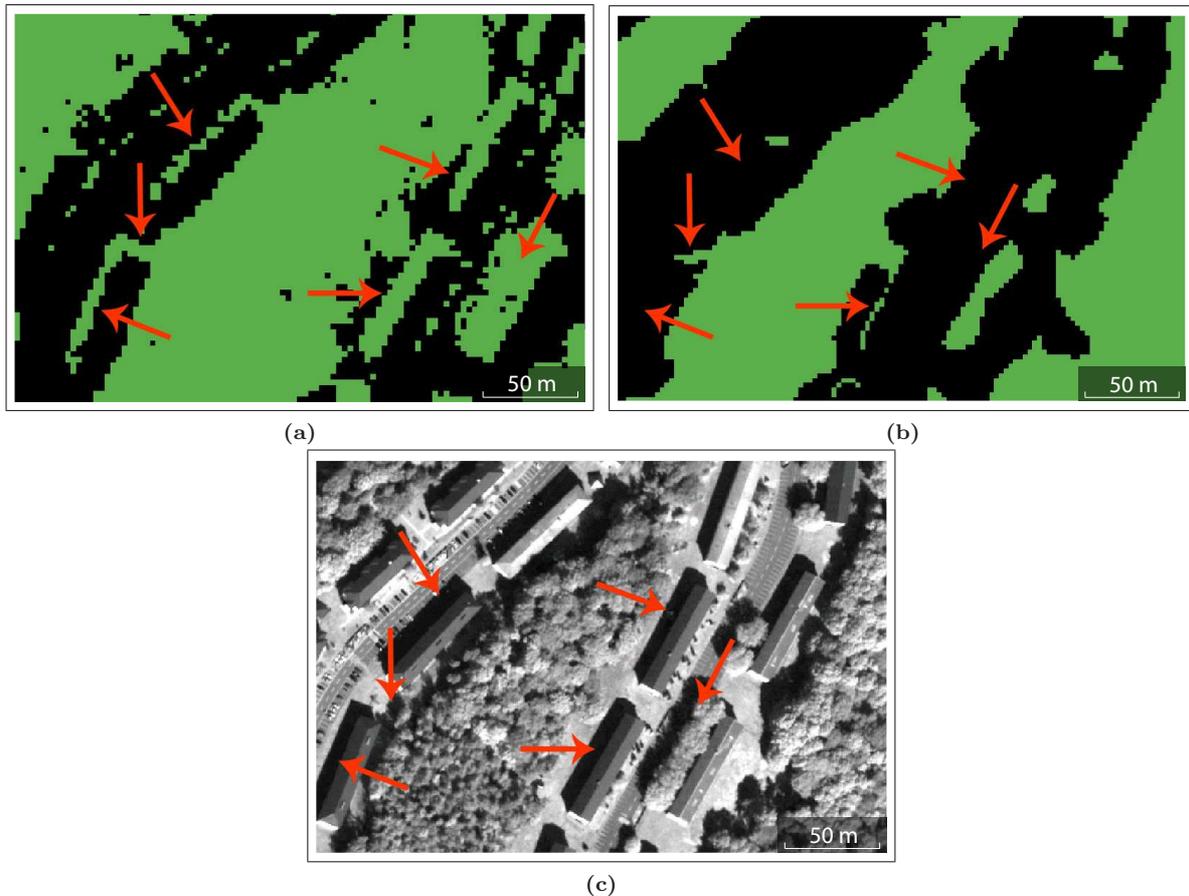
**Tabelle 6.10:** Vergleich der Genauigkeiten von Mean- und Median-QuickBird-Holzbodenmasken mit PanQB-Referenzdaten (327 Referenzpunkte für Wald und 261 für Nichtwald, siehe Kapitel 5.3)

Aus der Validierung der Holzbodenmasken mit den PanQB-Referenzdaten geht die 5 x 5-Median-Maske als beste hervor (Tabelle 6.11). Zusätzlich dazu wurde eine Genauigkeitsanalyse mit den BWI-Traktecken ausgeführt, bei der die Ein-Pixel-Holzbodenmaske mit 91,22% als schlechteste und die 7 x 7-Maske mit 94,49% als beste abschnitt. Die visuelle Bewertung der Holzbodenmasken zeigt, dass der Einfluss von Schatten problematisch ist. Insbesondere der 7 x 7-Maske gelingt es, diese Flächen der Objektklasse Nichtwald zuzuordnen.

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Herstellergenauigkeit	Nutzer-genauigkeit	Gesamtgenauigkeit	Kappa-Koeffizient	Verfahren zur Waldmaskenerstellung
Wald (PanQB)	325	2	99,39%	96,44%	97,62%	0,95	Ein-Pixel
Nichtwald (PanQB)	12	249	95,40%	99,20%			
Wald (PanQB)	324	3	99,08%	97,01%	97,79%	0,96	Median 5 x 5
Nichtwald (PanQB)	10	251	96,17%	98,82%			
Wald (PanQB)	321	6	98,17%	97,57%	97,62%	0,95	Median 7 x 7
Nichtwald (PanQB)	8	253	96,93%	97,68%			
Wald (PanQB)	323	4	98,78%	96,13%	97,11%	0,94	Median 9 x 9
Nichtwald (PanQB)	13	248	95,02%	98,41%			

**Tabelle 6.11:** Ergebnisse der Verifizierung verschiedener QuickBird-Holzbodenmasken mit PanQB-Referenzdaten

Desweiteren wurden die adaptierten Waldmasken verifiziert (Tabelle 6.12). Dabei zeigte sich sowohl anhand der Referenzdaten (BWI-Traktecken) als auch visuell, dass der 7 x 7-Medianfilter zur optimalen Walderkennung führt.



**Abbildung 6.4:** Unterschiedliche Klassifizierung der Schattenflächen durch die Holzbodenmasken (grün - Holzboden, schwarz - Nichtwald): Ein-Pixel (a) und 7x7-Pixel (Median) (b) im Vergleich zum panchromatischen QuickBird-Kanal (c), UG Pfälzerwald

## 6.5 Bewertung der Waldmasken durch die Verifizierung

Nur durch eine sinnvolle Verifizierung ist die Beurteilung und Einschätzung der Qualität der Waldmasken möglich. Eine visuelle Bewertung reicht dafür nicht aus, sondern es sind Zusatzdaten notwendig (siehe Kapitel 5.6). Flächendeckend waren Topographische Karten und die Geländeaufnahmen der BWI vorhanden und für einzelne Untersuchungsgebiete standen Orthofotos und digitale Forstgrundkarten zur Verfügung. Nachfolgend werden verschiedene Verfahren und Ergebnisse der Genauigkeitsanalyse vorgestellt, die aufgrund der Datenlage für das Untersuchungsgebiet Sachsen umfassender durchgeführt werden konnten. Dem schließt sich die Vorstellung und Bewertung der Waldmasken der anderen Untersuchungsgebiete an.

	Wald (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient	Verfahren zur Waldmasken- erstellung
Wald (BWI)	486	2	99,59%	95,29%	95,52%	0,82	Ein-Pixel
Nichtwald (BWI)	24	69	74,19%	97,18%			
Wald (BWI)	485	3	99,39%	96,04%	96,04%	0,84	Median 5 x 5
Nichtwald (BWI)	20	73	78,49%	96,05%			
Wald (BWI)	484	4	99,18%	96,61%	96,39%	0,86	Median 7 x 7
Nichtwald (BWI)	17	76	81,72%	95,00%			

Tabelle 6.12: Ergebnisse der Verifizierung verschiedener QuickBird-Waldmasken mit BWI-Traktecken

### 6.5.1 Genauigkeitsanalyse und Verifizierung der Waldmasken anhand des Untersuchungsgebietes Sachsen

#### Verifizierung mit Orthofotos

Ein Ansatz zur Verifizierung ist die Verwendung von Orthofotos als *ground truth*. Zum Auswertungszeitpunkt lagen flächendeckende Orthofotos lediglich für das Untersuchungsgebiet Sachsen vor, so dass die Evaluierung nur für diesen Untersuchungsraum durchgeführt wurde. Die Genauigkeitsbewertung basiert auf der systematischen Erhebung von Referenzdaten in Form von Kontrollpunkttrastern. Die Rasterweite beträgt einen Kilometer und die einzelnen Kontrollpunkte sind in 10 km x 10 km - bzw. 8 km x 8 km -Netzen verankert. Die Verteilung der einzelnen Raster über die Orthofotos erfolgte nicht zufällig sondern gezielt über „kritische“ Waldflächen, das heißt über Flächen, in denen u.a. die Erfassung zergliederter Waldgebiete in der Waldmaske begutachtet werden sollte (Abb. 6.5).

Durch visuelle Beurteilung wurden die Kontrollpunkte im Orthofoto einer der vier Klassen zugewiesen:

- sicher Wald
- sicher Nichtwald
- unsicher Wald
- unsicher Nichtwald.

Bei der Zuweisung in die einzelnen Klassen mussten die verschiedenen Auflösungen der Daten (Orthofoto: 0,8 m, Landsat: 25 m) berücksichtigt werden. Deshalb wurden Regeln für die Einordnung der Referenzdaten aufgestellt. Kontrollpunkte, die von mindestens zwei Pixeln

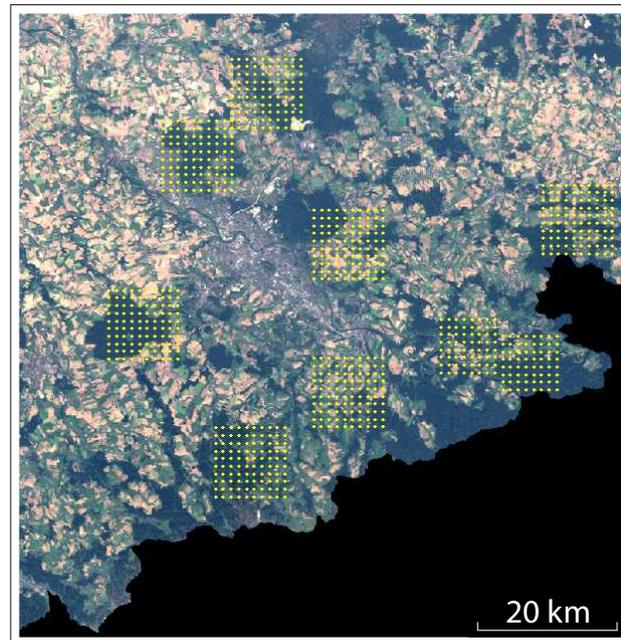


Abbildung 6.5: Verteilung der Kontrollpunktraster im Untersuchungsgebiet Sachsen

derselben Klasse in alle Richtungen umgeben sind, werden der sicheren Wald- bzw. Nichtwaldklasse zugewiesen. Alle anderen Punkte fallen in die Kategorie der unsicheren Klassen. Da die Zuordnung dieser Referenzdaten nur auf Basis der Orthofotos erfolgte und keine weiteren Zusatzdaten in diese Auswertung integriert wurden, ist keine direkte Genauigkeitsanalyse in Hinblick auf die BWI-Walddefinition möglich, denn es wurden nur bestockte Flächen miteinander verglichen. Somit sind bei einer Bewertung der Waldmaske gegebenenfalls Reduzierungen des Holzbodens durch die Adaption an die BWI-Walddefinition zu bedenken. Mit den neun Kontrollpunktrastern wurden im Untersuchungsgebiet Sachsen insgesamt 822 Punkte innerhalb acht verschiedener Forstämter untersucht.

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit
sicher Wald (Orthofoto)	322	5	98,47%	97,58%	98,10%
sicher Nichtwald (Orthofoto)	8	348	97,75%	98,58%	
unsicher Wald (Orthofoto)	37	35	51,39%	68,52%	62,59%
unsicher Nichtwald (Orthofoto)	17	50	74,63%	58,82%	
					92,09%

Tabelle 6.13: Zuordnungsmatrix der Kontrollpunkte für Orthofoto und Holzbodenmaske für das UG Sachsen (Landsat 7)

Anhand dieser Auswertung konnten Gesamtgenauigkeit, Genauigkeit der sicher und der unsicher zugeordneten Punkte berechnet werden (Tabelle 6.13). Durch die gezielte Auswahl der Kontrollpunkte in Waldgebieten ist die Verifizierung von vornherein beeinflusst worden. Dadurch können die erzielten Genauigkeiten unter Umständen eine geringfügig schlechtere Bewertung der Holzbodenerkennung zum Ausdruck bringen, so dass die reelle Gesamtgenauigkeit etwas höher als 92,09 % ist. Die Analyse der Fehler erster und zweiter Art (Tabelle 6.14)

Fehler erster Art (Holzboden laut Orthofoto nicht korrekt erkannt)	Fehler zweiter Art (Nichtwald laut Orthofoto nicht korrekt erkannt)
40 Kontrollpunkte (4,87%)	25 Kontrollpunkte (3,04%)

**Tabelle 6.14:** Fehleranalyse zum Vergleich Orthofoto - Holzbodenmaske für das UG Sachsen (Landsat 7) anhand der 822 Kontrollpunkte

zeigten, dass beide Fehlerarten durch Lageungenauigkeiten, Mischpixel und durch die Lage an Waldaußenrändern verursacht werden. Diese Erkenntnis bekräftigt die Unterscheidung der Referenzpunkte in die Klassen sicher und unsicher. Teilweise war die Qualität der Orthofotos schlecht, so dass in wenigen Fällen die Kontrollpunkte falsch zugeordnet wurden. Zudem wurde festgestellt, dass Fehler erster Art durch das schwierige Erkennen von Laubwald und Jungbeständen entstanden sind.

Dieses Verfahren hat sich als eine sichere und zuverlässige Methode zur Beurteilung der Qualität der erstellten Waldmasken erwiesen. Gleichwohl sollte erwähnt werden, dass dieses Verfahren sehr aufwendig und zeitintensiv ist.

### Verifizierung mit Geländeaufnahmen der BWI

Ausgangspunkt für ein weiteres Verfahren zur Ermittlung der Klassifizierungsgenauigkeit waren die Geländeaufnahmen der BWI. Für eine detailliertere Genauigkeitsanalyse wurden die Traktaufnahmen in „sichere Trakte“ eingeteilt, zu denen die Trakte zählen, bei denen alle vier Traktecken im Wald (= sicher Wald) oder Nichtwald (= sicher Nichtwald) liegen. Alle übrigen Trakte sind dementsprechend „unsichere Trakte“. Werden die auf diese Weise gruppierten Referenzdaten mit den korrespondierenden Punkten in der Waldmaske verglichen, ergeben sich daraus Konfusionsmatrizen, hier am Beispiel der Verifizierung mit sicheren Trakten dargestellt (Tabelle 6.15). Dadurch sind bestimmte Fehlerursachen unterrepräsentiert, wie Mischpixel an Waldrändern oder Lageungenauigkeiten, wodurch die Genauigkeit zu hoch geschätzt wird. Folglich ist die mit den unsicheren Traktecken bestimmte Genauigkeit geringer (Tabelle 6.16).

Die Berücksichtigung aller 2.453 zur Verfügung stehenden Referenzpunkte im Untersuchungsgebiet Sachsen hat sich als beste Variante herausgestellt, um die korrekte, also der tatsächlichen Übereinstimmung zwischen Holzboden- bzw. Waldmaske und realem Wald entsprechende, Genauigkeit zu berechnen (Tabelle 6.17). Aus diesem Grund werden die Verifizierungsergebnisse aller Untersuchungsgebiete in genannter Form dargestellt.

Eine spezielle Sichtweise auf die Genauigkeitsanalyse haben einerseits die Hersteller der Wald-

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit
Wald (Referenz)	373	7	98,16%	90,53%	97,49%
Nichtwald (Referenz)	39	1413	97,31%	99,51%	

Tabelle 6.15: Genauigkeiten der „sicheren“ Holzbodenmaske UG Sachsen

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit
Wald (Referenz)	272	45	85,80%	89,18%	87,44%
Nichtwald (Referenz)	33	271	89,14%	85,76%	

Tabelle 6.16: Genauigkeiten der „unsicheren“ Holzbodenmaske UG Sachsen

masken, deren Interesse die richtige Klassifizierung der Satellitenbilder ist, und andererseits die Nutzer, die eine bestmögliche Übereinstimmung der Waldmasken mit der Realität erwarten, so dass ebenfalls Hersteller- und Nutzergenauigkeiten angegeben werden. Als weitere Größe zur Beurteilung der Genauigkeit wird der Kappa-Koeffizient ( $\kappa$ ) angegeben (siehe Kapitel 5.6.2), der mit der Gesamtgenauigkeit in Abhängigkeit der Verteilung der Holzboden- bzw. Wald- und Nichtwaldreferenzpunkte korreliert. Die für  $\kappa$  berechneten Werte liegen bis auf eine Ausnahme (UG Westliches Mittelgebirge, Landsat 5) alle über 0,8 und zeigen damit ein sehr hohes Maß der Übereinstimmung.

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (Referenz)	645	52	92,54%	89,96%	94,94%	0,88
Nichtwald (Referenz)	72	1684	95,90%	97,00%		

Tabelle 6.17: Gesamtgenauigkeiten der Holzbodenmaske UG Sachsen

Die Adaption an die BWI-Walddefinition (siehe Kapitel 5.5.3) führte zur Verbesserung der Genauigkeiten. Die Gesamtgenauigkeit ist auf 95,47 % gestiegen (Tabelle 6.18).

Die auftretenden Fehlklassifikationen können in zwei Kategorien unterteilt werden: Fehler erster Art: Wald wird fälschlicherweise als Nichtwald klassifiziert und Fehler zweiter Art: Nichtwald wird als Wald klassifiziert. Eine gezielte Fehleranalyse wurde anhand der vorliegenden Orthofotos durchgeführt. Dabei kristallisierten sich die folgenden drei Fehlerkategorien heraus (Tabelle 6.19):

	Wald (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (Referenz)	648	49	92,97%	91,27%	95,47%	0,89
Nichtwald (Referenz)	62	1694	96,47%	97,19%		

Tabelle 6.18: Genauigkeiten der adaptierten Waldmaske des UG Sachsen

- Kategorie 1: Fehler am Waldaußenrand: der entsprechende Referenzpunkt liegt ein Pixel entfernt vom Waldaußenrand (entweder ausserhalb oder innerhalb des Waldes)
- Kategorie 2: Fehler der Waldmaske
- Kategorie 3: Fehler der BWI: der Traktecke wurde ein falscher Status zugewiesen

Fehlerkategorie	Fehler erster Art (Wald als Nichtwald klassifiziert)	Fehler zweiter Art (Nichtwald als Wald klassifiziert)
1 - Fehler am Waldrand	41 Referenzpunkte (1,67%)	48 Referenzpunkte (1,96%)
2 - Fehler der Waldmaske	8 Referenzpunkte (0,33%)	5 Referenzpunkte (0,20%)
3 - Fehler der BWI	0 Referenzpunkte (0%)	9 Referenzpunkte (0,37%)

Tabelle 6.19: Fehleranalyse der adaptierten Waldmaske des UG Sachsen (basierend auf 2453 BWI-Referenzpunkten)

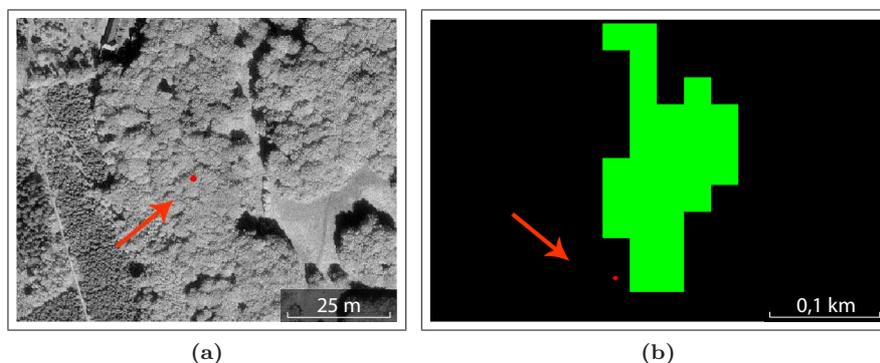


Abbildung 6.6: Fehleranalyse: BWI-Traktecke mit Status Nichtwald (Fehler der Kategorie 3) (a), Waldtraktecke, die außerhalb der Waldmaske liegt (grün - Wald, schwarz - Nichtwald) (Fehler der Kategorie 1) (b)

Der Großteil der beobachteten Fehlklassifizierungen (siehe Abb. 6.6) fällt in die Kategorie „Fehler am Waldrand“. Eine Ursache dieser Fehler ist auf das Zusammentreffen zwei verschiedener Landnutzungsklassen am Waldaußenrand zurückzuführen, deren unterschiedliche Spektralwerte in einem Pixel vereint werden. Dieses Mischpixel macht eine korrekte Zuordnung zu der Objektklasse Wald oder Nichtwald kompliziert. Diese Fehlzuordnungen können ebenfalls von den beschriebenen Lageungenauigkeiten der BWI-Punkte oder der Satellitenszenen verursacht werden.

Aus der Verschneidung von Raster- und Vektordaten mit der Software ERDAS Imagine können in Abhängigkeit von Anzahl und Reihenfolge der einzelnen Verschneidungsschritte Verschiebungen der Daten im Vergleich zum Original resultieren. Demzufolge sind Überprüfung und gegebenenfalls Korrektur dieser verschneidungsbedingten Lageabweichungen nötig.

### Flächendeckende Verifizierung

Ein quantitativ und qualitativ anderer Ansatz ist die flächendeckende Verifizierung der Waldmasken. Für diese Verifizierungsvariante können Topographische Karten oder Vektordaten (z.B. ATKIS) als Referenz eingesetzt werden. Durch den Übergang von einzelnen Referenzpunkten zur Fläche wird das gesamte klassifizierte Satellitenbild durch Referenzdaten abgedeckt. Daraus resultiert im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Verfahren ein deutlicher Anstieg der miteinander verglichenen Pixel.

	Wald (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit
Wald (Vegetationslayer TK)	50.744.657	6.202.911	89,11%	89,22%	93,86%
Nichtwald (Vegetationslayer TK)	6.128.318	137.831.745	95,74%	95,69%	

Tabelle 6.20: Konfusionsmatrix des Vegetationslayers der TK und der adaptierten Waldmaske des UG Sachsen

Bevor mit der Interpretation der in Tabelle 6.20 dargestellten Ergebnisse begonnen werden kann, muss auf einige zu beachtende Aspekte hingewiesen werden. Die verschiedenen Verifizierungsverfahren stellen die Übereinstimmung mit den jeweiligen Referenzdaten dar, die aber nicht notwendigerweise mit der Zielgröße, dem Wald laut BWI-Definition, identisch sein müssen. Voraussetzung für einen korrekten Vergleich wären zeitlich übereinstimmende Aufnahmen. Die Aktualität der hier verwendeten TK umfasst einen Zeitraum von 1989 bis 2004, so dass daraus Defizite entstehen können. Weiterhin entspricht die Definition des Vegetationslayers nicht der des BWI-Waldes, was zu Abweichungen der Flächen führt (z.B. Mindestwaldfläche, Parkanlagen). Ebenso bringen die unterschiedlichen Auflösungen der Daten Schwierigkeiten mit sich, denn dadurch ist der Vegetationslayer der TK differenzierter und präziser erstellt worden, als das bei der Waldmaske möglich ist. Beispielsweise ist das Wegenetz im Vegetationslayer nicht als Waldfläche ausgewiesen, was in der Summe einen Großteil der Unterschiede zwischen Nichtwald (Vegetationslayer) und Wald (Waldmaske) ausmacht. Ebenso macht sich die höhere Auflösung des Vegetationslayers an der Erkennung von Waldgrenzen bemerkbar, die demzufolge zu Differenzen zwischen den Referenzdaten und der Waldmaske führt. Neben den datenbedingten Abweichungen waren vor allem junge Wiederaufforstungsflächen und sehr gering bestockte Flächen diejenigen, die in der Waldmaske nicht als Wald erkannt wurden.

Diese aufgezeigte Variante kann nur als eine Orientierung zur Genauigkeitsanalyse gesehen werden. So zeigt sich auch beim direkten Vergleich zwischen den BWI-Trakteckeninformationen und dem Vegetationslayer lediglich eine Übereinstimmung von 96,73 %.

### Flächenbilanz im Vergleich zur BWI-Waldfläche

Neben der Visualisierung der klassifizierten Daten in Form von thematischen Karten kann auch die Gesamtfläche der Waldgebiete ermittelt werden. Dies ermöglicht einen Vergleich mit der über die Traktecken der BWI geschätzten Waldfläche. Allerdings ist diese Flächenbilanz nur der summarische Vergleich der Gesamtwaldfläche ohne Lagebezug. Das schließt nicht aus, dass im Detail erhebliche Lageabweichungen zwischen Wald laut BWI und Waldmaske vorhanden sein können, ohne dass diese in der Summe sichtbar sind.

Datengrundlage	Bezugseinheit	Waldfläche in ha	Waldanteil in %	Gesamtfläche in ha
Waldmaske	Pixel	140.975	28,31%	498.016
Vegetationslayer (TK)	Pixel	141.126	28,34%	498.016
Holzbodenmaske	Pixel	143.433	28,80%	498.016
BWI-Wald	BWI-Traktecke	147.789	29,68%	498.016

Tabelle 6.21: Flächenbilanz für das UG Sachsen

Aus der Interpretation der in Tabelle 6.21 abgebildeten Ergebnisse geht hervor, dass die über die BWI-Daten hochgerechnete Waldfläche die größte ist. Bei einer Gesamtfläche dieses Untersuchungsgebietes von 498.016 ha beträgt der BWI-Waldanteil demnach 29,68 %. Die mittels Fernerkundung erkannte bestockte Fläche ist hingegen kleiner. Die Differenz zwischen BWI-Wald und Holzbodenmaske beträgt 4.356 ha. Nach der Adaption dieser Maske (siehe Kapitel 5.5.3) reduziert sich die Waldfläche um 2.458 ha, so dass der Abstand zur BWI-Waldfläche weiter zunimmt und die geringste „Waldfläche“ in der Waldmaske zu finden ist. Der relative Stichprobenfehler der BWI-Waldfläche für das Untersuchungsgebiet Sachsen beträgt 5,4 %. Somit liegen alle errechneten Waldflächen in dem der BWI-Fehlerbetrachtung zugrunde liegenden Konfidenzintervall.

### Resümee zu den Verifizierungsverfahren

Die für das Untersuchungsgebiet Sachsen vorgestellten Verifizierungsverfahren liefern für die selbe Waldmaske unterschiedliche Genauigkeiten (Tabelle 6.22). Daraus geht deutlich hervor, dass das jeweils dargestellte Verifizierungsergebnis die Übereinstimmung der Klassifizierung mit den verwendeten Referenzdaten repräsentiert. Nicht in jedem Fall muss damit das Objekt „Wald laut BWI-Walddefinition“ erkannt werden. Ebenso haben die Genauigkeitsanalysen mit den verschiedenen Verfahren gezeigt, dass teilweise ein hoher Arbeitsaufwand nötig ist. Demzufolge sollten Zweck und operationale Anwendbarkeit bei der Wahl eines Verifizierungsverfahrens berücksichtigt werden (Kosten-Nutzen-Aufwand).

Aufgrund der Datenlage und der Kosten-Nutzen-Abwägung wurden zur Verifizierung für alle Untersuchungsgebiete die BWI-Daten als Referenz gewählt.

Verifizierungsverfahren	Gesamtgenauigkeit
Orthofoto	92,09%
Vegetationslayer (TK)	93,13%
BWI-Traktecken	94,94%
BWI-Traktecken sicher	97,49%

**Tabelle 6.22:** Übersicht der Verifizierungsverfahren für die Holzbodenmaske des UG Sachsen

## 6.5.2 Bewertung der Waldmasken des Untersuchungsgebietes Westliches Mittelgebirge

### Landsat 7-Daten

Die Auswertung der Landsat 7-Daten wurde durch einen geringen Wolkenanteil (1,3 % des gesamten UG) in der nördlichen Szene beeinträchtigt. Da nicht eindeutig festzustellen war, welche Landnutzungsform unter den Wolken zu finden ist, wurde eine Maske für Wolken und deren Schatten entwickelt. Alle somit detektierten Objekte wurde der „Wolkenklasse“ zugeordnet, die sich über eine Fläche von insgesamt 10.317 ha erstreckt. Die entsprechenden Holzboden- oder Nichtwaldinformationen können über fortschreitende Satellitenbilddauswertungen oder andere Zusatzinformationen erhoben werden.

Durch das in Rheinland-Pfalz verdichtete Stichprobennetz der BWI standen mehr Referenzdaten als für die Landsat 5-Daten zur Verfügung. Die Gesamtgenauigkeit für die Holzbodenmaske liegt bei 92,08 % und bei 92,75 % für die Waldmaske. Durch die enorme Größe des Untersuchungsgebietes mit 8.000 km<sup>2</sup> und der Verteilung der Waldgebiete, die von geschlossen bis stark zergliedert reicht, ist von vornherein eine höhere Fehlerwahrscheinlichkeit gegeben. Die Anzahl der Fehlklassifizierungen ist auf Holzboden- und Nichtwaldgebiete gleich verteilt. Durch die Lage der Referenzpunkte an Waldgrenzen in Kombination mit der geometrischen Qualität der Daten wird der größte Anteil der Fehler verursacht (siehe Abb. 6.7). Im Weiteren ist der Aufnahmezeitpunkt der Nordszene im Mai ungünstig für die Unterscheidung von Wald- und landwirtschaftlichen Flächen, so dass u.a. Dauergrünland und Ackerflächen als Holzboden ausgewiesen wurden. Deshalb ist ein deutlicher Unterschied der Fehlzuweisungen zwischen Nord- und Südteil des Untersuchungsgebietes festzustellen. Eine sinnvolle Trennung dieser sich spektral überlappenden Signaturen ist nur durch eine Integration von zusätzlichen Daten möglich. So führte beispielsweise die über ATKIS-Daten unterstützte Zuweisung der Acker- und Grünlandflächen zum Nichtwald zu einer Steigerung der Gesamtgenauigkeit der Waldmaske auf 93,58 %.

### Landsat 5-Daten

Mit einer Gesamtgenauigkeit von nur 88,88 % liegt diese Waldmaske im untersten Bereich aller errechneten Genauigkeiten. Im Gegensatz zur Landsat 7-Maske lagen für die Genauigkeitsanalyse weniger Referenzpunkte vor. Die Qualität dieser Waldmaske ist wiederum durch das

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (Referenz)	1297	109	92,25%	92,78%	92,08%	0,84
Nichtwald (Referenz)	101	1143	91,88%	91,29%		

Tabelle 6.23: Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Westliches Mittelgebirge (Landsat 7)

	Wald (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (Referenz)	1306	100	92,89%	93,42%	92,75%	0,85
Nichtwald (Referenz)	92	1152	92,60%	92,01%		

Tabelle 6.24: Genauigkeiten der Waldmaske UG Westliches Mittelgebirge (Landsat 7)

Aufnahmedatum der Nordszene am 25. Mai 1989 geprägt, durch das eine Trennung zwischen landwirtschaftlichen und Holzbodenflächen schwierig war. Teilweise erscheint die Zuweisung des Traktstatus der BWI-Traktecken fragwürdig. Wie bereits im vorherigen Abschnitt beschrieben, geht der Großteil der Fehler auf die kritische Lage der Referenzpunkte an Waldrändern zurück.

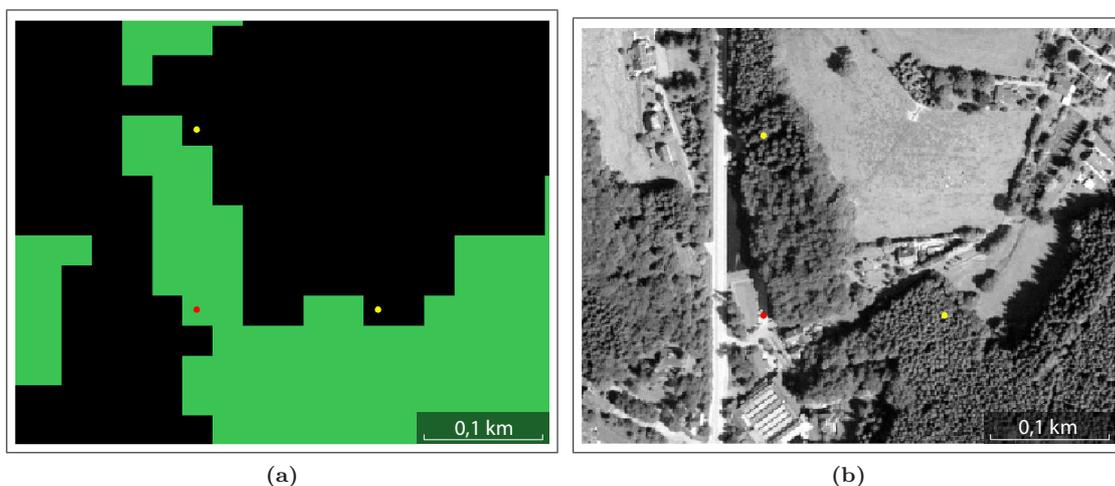


Abbildung 6.7: Fehlklassifizierungen der Kategorie Nichtwald (roter Referenzpunkt) und Holzboden (gelbe Referenzpunkte), wobei schwarze Flächen Nichtwald und grüne Flächen Holzboden darstellen. Ausschnitt aus Holzbodenmaske (a) und Orthofoto (b) des UG Westliches Mittelgebirge, Landsat 5

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (Referenz)	936	122	88,47%	91,94%	88,89%	0,77
Nichtwald (Referenz)	82	696	89,46%	85,09%		

Tabelle 6.25: Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Westliches Mittelgebirge (Landsat 5)

### 6.5.3 Bewertung der Waldmasken des Untersuchungsgebietes Nordostdeutschland

Das im nordostdeutschen Tiefland gelegene Untersuchungsgebiet erreicht mit 95,7% für die Holzbodenmaske und 96,01% für die Waldmaske die besten Gesamtgenauigkeiten. Ausschlaggebend dafür ist die überwiegend planare Ausprägung des Geländes, die zu einer sehr guten und zuverlässigen Erkennung von Waldflächen beiträgt. Das Vorkommen inselartiger Waldgebiete beeinträchtigte die präzise Klassifizierung nicht. Die Genauigkeitsanalyse mit ATKIS-Daten und Topographischen Karten hat zu Unstimmigkeiten im Gebiet ehemaliger Truppenübungsplätze (z.B. Rossower Heide, Sperrgebiet Kienheide) geführt, die mit den vorhandenen Daten nicht zu klären waren. Aktuelle und verlässliche Informationen zu diesen Standorten sind kaum verfügbar.

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (Referenz)	1356	69	95,16%	92,31%	95,70%	0,90
Nichtwald (Referenz)	113	2696	95,98%	97,50%		

Tabelle 6.26: Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Nordostdeutschland (Landsat 7)

	Wald (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (Referenz)	1361	64	95,51%	92,84%	96,01%	0,91
Nichtwald (Referenz)	105	2704	96,26%	97,69%		

Tabelle 6.27: Genauigkeiten der Waldmaske UG Nordostdeutschland (Landsat 7)

### 6.5.4 Bewertung der Waldmasken des Untersuchungsgebietes Alpen

Der größte Anteil an Gesamtwaldfläche aller Untersuchungsgebiete ist in den Alpen (UG Alpen) zu finden. Die Anzahl der BWI-Traktecken in diesem Gebiet wurde zwischen beiden Inventuren nicht durch Verdichtungen des Stichprobennetzes verändert. Die Genauigkeiten dieses stark reliefierten Gebietes sind im Vergleich zu den anderen Untersuchungsgebieten für die Masken der Landsat 7-Daten mit 91,73% (Holzbodenmaske) und 92,46% (Waldmaske) am geringsten.

## Landsat 7-Daten

Das UG Alpen ist mit einer Vielzahl an Mooren (Filzen) ausgestattet, wobei durch die Kultivierung, insbesondere das Trockenlegen der Sumpf- und Mooregebiete, Sukzessionsflächen entstehen, auf denen sich Waldgebiete entwickeln können. Diese Flächen gehören zu den potentiellen Umwandlungsflächen und werden entsprechend des aktuellen Sukzessionsstadiums als Holzbodenfläche ausgewiesen. Laut BWI-Walddefinition zählen im Wald gelegene Sümpfe und Moore zum Wald, insofern sie zugewachsen sind. Allerdings wäre eine gesonderte Ausweisung dieser Flächen sinnvoll, denn nicht immer ist eine eindeutige Zuordnung zum Wald aufgrund der laut Definition beschriebenen Lagebeschreibung „im Wald gelegen“ möglich, wodurch sich Fehlklassifizierungen ergeben. Schwierigkeiten der korrekten Erkennung traten auch bei unproduktiven Waldflächen auf, da sich je nach Anteil der Bodenreflexion die Signaturen von denen des produktiven Waldes unterscheiden. Eine weitere Fehlerquelle kann von reliefbedingten Beleuchtungseffekten ausgehen, wobei aufgrund mangelnder Zusatzinformationen keine Beurteilung dieses Einflusses möglich war.

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
<b>Wald (Referenz)</b>	527	38	93,27%	92,78%	91,73%	0,83
<b>Nichtwald (Referenz)</b>	41	349	89,49%	90,18%		

Tabelle 6.28: Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Alpen (Landsat 7)

	Wald (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
<b>Wald (Referenz)</b>	534	31	94,51%	92,87%	92,46%	0,84
<b>Nichtwald (Referenz)</b>	41	349	89,49%	91,84%		

Tabelle 6.29: Genauigkeiten der Waldmaske UG Alpen (Landsat 7)

## Landsat 5-Daten

Bei der Klassifizierung der Landsat 5-Daten traten neben den bereits beschriebenen Unsicherheiten in der „Moorzone“ vereinzelt Fehlzuzuweisungen von Felsformationen zur Holzbodenfläche auf, wobei nicht zweifelsfrei ausgeschlossen werden kann, dass diese durch Latschenfelder oder Strauchflächen bestockt sind, da für diese Region kein ausreichend genaues Zusatzdatenmaterial zur Verifizierung vorliegt. Jedoch würde die Einordnung der Felsen zur Waldfläche laut BWI-Walddefinition zulässig sein, denn im Wald gelegene Felsen und Blockhalden zählen zum Nichtholzboden, wobei auch hier eine Verfeinerung der Definition angebracht erscheint. Aus der Genauigkeitsanalyse geht hervor, dass zwischen den beiden Holzbodenmasken lediglich ein Unterschied von 0,17 % besteht.

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (Referenz)	511	39	92,91%	92,74%	91,56%	0,83
Nichtwald (Referenz)	40	346	89,64%	89,87%		

Tabelle 6.30: Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Alpen (Landsat 5)

### 6.5.5 Bewertung der Waldmasken des Untersuchungsgebietes Pfälzerwald

#### Landsat 7-Daten

Das Untersuchungsgebiet Pfälzerwald ist durch einen hohen Waldanteil geprägt, was sich bereits aus der Verteilung der Referenzpunkte ableiten lässt. Daher konnte für die Holzbodenmaske mit 94,97 % und für die Waldmaske mit 95,17 % eine gute Gesamtgenauigkeit erreicht werden.

Im Verhältnis zu der hohen Gesamtanzahl von insgesamt 3.540 Referenzpunkten, die durch die zusätzlichen Aufnahmen im Biosphärenreservat Pfälzerwald verfügbar waren, ist der Fehleranteil gering. Auffallend war die hohe Fehlklassifizierungsrate im Nichtwald. Bei Fehlzuweisungen innerhalb größerer geschlossener Waldgebiete handelte es sich sowohl um gering bestockte Flächen als auch um Strassen, Waldwege und Flüsse geringer Breite, die teilweise von Baumkronen bedeckt waren und aufgrund der Auflösung der Landsat-Daten schlecht erkannt wurden. Im Bereich fragmentierter Waldgebiete waren Mischpixel häufig eine Fehlerquelle. Im Vergleich zum Orthofoto und Topographischen Karten konnten mehrfach Unstimmigkeiten mit dem Traktstatus von Nichtwald-Traktecken festgestellt werden, wobei eine nachträgliche Beurteilung aufgrund der Aktualität der Daten schwierig war. Teilweise bereitete die Trennung von Holzbodenflächen und Weinanbaugebieten aufgrund ähnlicher Signaturen Komplikationen. Eine weitere Fehlerursache ist auf Lageabweichungen der Satellitenbilder zurückzuführen.

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (Referenz)	1852	57	97,01%	93,87%	94,97%	0,90
Nichtwald (Referenz)	121	1510	92,58%	96,36%		

Tabelle 6.31: Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Pfälzerwald (Landsat 7)

#### Landsat 5-Daten

Die für die Landsat 5-Daten berechnete Gesamtgenauigkeit von 93,92 % liegt nur leicht unter der der Landsat 7-Szene. Die Verifizierung hat gezeigt, dass kleinere Holzbodenflächen und

	Wald (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (Referenz)	1854	55	97,12%	94,11%	95,17%	0,90
Nichtwald (Referenz)	116	1515	92,89%	96,50%		

Tabelle 6.32: Genauigkeiten der Waldmaske UG Pfälzerwald (Landsat 7)

bestockte Flächen in Form von Streifen nicht immer korrekt erfasst wurden. Weinanbauflächen waren auch bei der Auswertung der Landsat 5-Daten ein Grund für Fehlklassifizierungen von Holzboden.

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (Referenz)	453	28	94,18%	94,38%	93,92%	0,88
Nichtwald (Referenz)	27	397	93,63%	93,41%		

Tabelle 6.33: Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Pfälzerwald (Landsat 5)

### 6.5.6 Bewertung der QuickBird-Waldmasken des Untersuchungsgebietes Pfälzerwald

Die ersten Genauigkeitsanalysen der QuickBird-Waldmasken lieferten nicht die erwarteten Ergebnisse. Die mittels der BWI-Traktecken als Referenzmaterial errechnete Gesamtgenauigkeit lag bei 92,60 % (Tabelle 6.34) und war somit 2,37 % schlechter als die der Landsat 7-Waldmaske für das Untersuchungsgebiet Pfälzerwald.

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (BWI)	485	3	99,39%	92,38%	92,60%	0,67
Nichtwald (BWI)	40	53	56,99%	94,64%		

Tabelle 6.34: Genauigkeiten einer QuickBird-Holzbodenmaske basierend auf BWI-Signaturen

Die QuickBird-Satellitenszene nimmt nur ein Sechstel des von den Landsat-Daten abgedeckten Gebietes ein. Damit ist auch der Anteil der verfügbaren Signaturen zur Schwellenwertfestlegung wesentlich geringer. Die BWI-Traktecken, die zur Signaturerhebung herangezogen wurden, sind zudem für eine optimale Wald/Nichtwaldtrennung ungünstig verteilt, denn es stehen 488 Wald- und nur 93 Nichtwald-Traktecken zur Verfügung, das heißt über 80 % des Untersuchungsgebietes sind Wald. Außerdem stehen weitere 425 Traktecken-Informationen der Biosphärenreservat-Aufnahmen (BR) bereit, die allerdings alle im Wald liegen und somit keinen Beitrag zur Abgrenzung der heterogenen Nichtwaldregionen leisten.

Deshalb wurde für die QuickBird-Daten ein Verfahren zur Waldmaskenerstellung entwickelt (siehe Kapitel 5.3), bei dem die Punkte zur Signaturerhebung direkt aus der hochaufgelösten panchromatischen QuickBird-Szene abgeleitet werden. Dadurch sind lagebedingte Fehler sowohl bei der Spektralwertextraktion als auch bei der Verifizierung von vornherein ausgeschlossen, was sich in der hohen Genauigkeit der fernerkundungsbasierten Holzbodenmaske<sup>1</sup> von 97,62% widerspiegelt. Zusätzlich ist eine unabhängige Verifizierung mit den BWI-Traktecken möglich, die zu einer Genauigkeit von 94,49% derselben Holzbodenmaske (Tabelle 6.35) führt. Die Differenz von 3,13% ist nicht unerheblich und zeigt, dass eine Adaption der Holzbo-

	Holzboden (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (PanQB)	321	6	98,17%	97,57%	97,62%	0,95
Nichtwald (PanQB)	8	253	96,93%	97,68%		
Wald (BWI)	477	11	97,75%	95,78%	94,49%	0,79
Nichtwald (BWI)	21	72	77,42%	86,75%		

**Tabelle 6.35:** Genauigkeiten der QuickBird-Holzbodenmaske, mit PanQB-Referenzdaten (oben) und BWI-Traktecken (unten) analysiert

denmaske entsprechend der BWI-Definition notwendig ist. Dadurch steigt die mit den BWI-Referenzdaten ermittelte Genauigkeit auf 96,39% und die PanQB-Referenzdaten-Genauigkeit sinkt auf 95,75% (Tabelle 6.36). Werden zu den BWI-Traktecken noch die Aufnahmen des Biosphärenreservates hinzugezogen, dann ist ein weiterer Anstieg der Gesamtgenauigkeit auf 97,71% zu verzeichnen.

	Wald (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient
Wald (PanQB)	318	9	97,25%	95,21%	95,75%	0,91
Nichtwald (PanQB)	16	245	93,87%	96,46%		
Wald (BWI)	484	4	99,18%	96,61%	96,39%	0,86
Nichtwald (BWI)	17	76	81,72%	95,00%		
Wald (BWI+BR)	907	6	99,34%	98,16%	97,71%	0,86
Nichtwald (BWI+BR)	17	76	81,72%	92,68%		

**Tabelle 6.36:** Genauigkeiten der QuickBird-Waldmaske, mit PanQB-Referenzdaten (oben), BWI-Traktecken (Mitte) und Aufnahmen des Biosphärenreservates (BR) und BWI-Traktecken (unten) analysiert

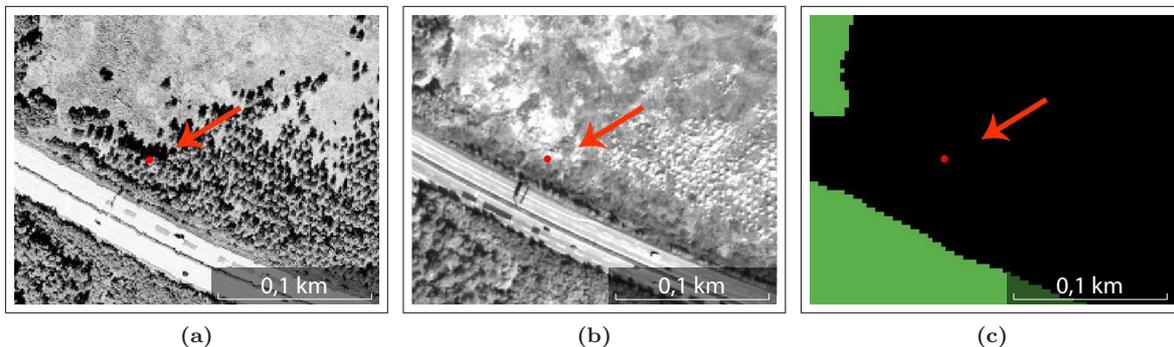
Als abschließender Schritt der Genauigkeitsbewertung wurde eine Fehleranalyse durchgeführt. Die Diskrepanz zwischen der QuickBird-Waldmaske und den PanQB-Referenzdaten ist auf die

<sup>1</sup>Die Holzbodenmaske wurde mit einem 7 x 7-Medianfilter erstellt (siehe Kapitel 6.4.2).

Adaption der Holzbodenmaske an die BWI-Definition zurückzuführen, da sich die BWI-Walddefinition deutlich von den angewandten Kriterien der Walderkennung über Fernerkundungsdaten unterscheidet. Aus diesem Grund sind die PanQB-Referenzdaten keine sinnvolle Variante zur Ermittlung der Waldmaskengenauigkeit. Als optimale Referenz bieten sich die Aufnahmen des Biosphärenreservates und die BWI-Traktecken zur Validierung der adaptierten Waldmaske an. Tabelle 6.37 stellt die solcherart ermittelte Verteilung der Fehler auf die vier verschiedenen Fehlerkategorien dar. Die größte Anzahl von Fehlern tritt an Waldrändern auf, da hier insbesondere die Lageungenauigkeiten zum Tragen kommen. Eine weitere Fehlerquelle ist durch die zeitliche Differenz von zwei Jahren zwischen der Aufnahme der BWI- und QuickBird-Daten gegeben (siehe Abb. 6.8).

	Fehler 1. Art (Wald als Nichtwald klassifiziert)	Fehler 2. Art (Nichtwald als Wald klassifiziert)
Fehler am Waldrand	3 Referenzpunkte (0,30%)	13 Referenzpunkte (1,29%)
Fehler der Waldmaske	1 Referenzpunkt (0,10%)	0 Referenzpunkte (0%)
Fehler aufgrund zeitlicher Differenz	2 Referenzpunkte (0,20%)	0 Referenzpunkte (0%)
Fehler der BWI	0 Referenzpunkte (0%)	4 Referenzpunkte (0,40%)

**Tabelle 6.37:** Fehleranalyse der adaptierten QuickBird-Waldmaske mit Aufnahmen des Biosphärenreservates und BWI-Traktecken als Referenzdaten (insgesamt 1006 Referenzpunkte)



**Abbildung 6.8:** Fehleranalyse: BWI-Traktecke mit Status Wald im Orthofoto (a), im QuickBird-Pan-Kanal (b) und in der QuickBird-Waldmaske (c) (grün - Wald, schwarz - Nichtwald)

### 6.5.7 Vergleich der Landsat 7- und QuickBird-Waldmaske des Untersuchungsgebietes Pfälzerwald

Nach der Vorstellung verschiedener Verfahren zur Genauigkeitsanalyse und der Bewertung der Holzboden- und Waldmasken für die einzelnen Untersuchungsgebiete soll an dieser Stelle auf die Unterschiede zwischen Landsat 7 und QuickBird anhand der von beiden Sensoren abgedeckten Fläche des UG Pfälzerwald eingegangen werden. Die Genauigkeitsanalyse mittels BWI-Traktecken ergab für die QuickBird-Waldmaske eine Gesamtgenauigkeit von 96,39 %, wo-

hingegen die Genauigkeit von 95,01 % der Landsat 7-Waldmaske 1,38 % darunter liegt (Tabelle 6.38).

	Wald (Waldmaske)	Nichtwald (Waldmaske)	Hersteller- genauigkeit	Nutzer- genauigkeit	Gesamt- genauigkeit	Kappa- Koeffizient	Satellit
Wald (BWI)	481	7	98,57%	95,63%	95,01%	0,80	Landsat7
Nichtwald (BWI)	22	71	76,34%	91,03%			
Wald (BWI)	484	4	99,18%	96,61%	96,39%	0,86	QuickBird
Nichtwald (BWI)	17	76	81,72%	95,00%			

Tabelle 6.38: Genauigkeiten für die Landsat 7- und QuickBird-Waldmasken, UG Pfälzerwald

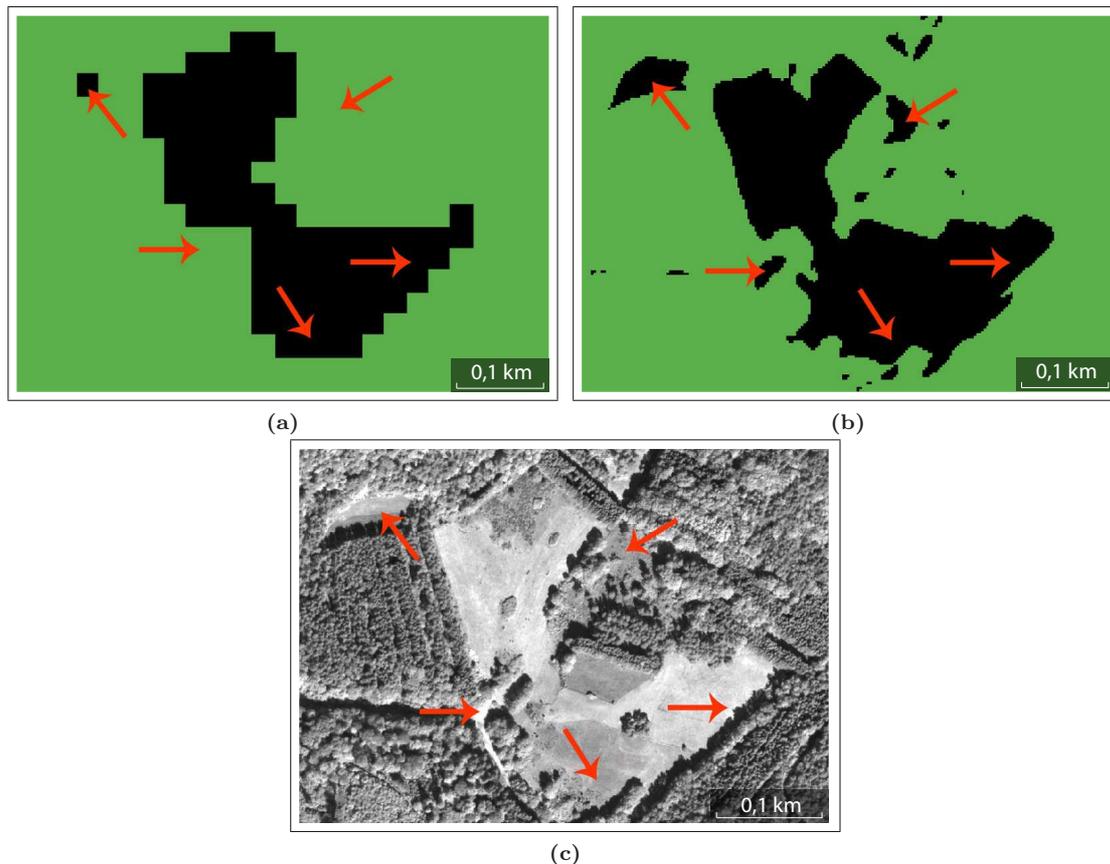
Der direkte Vergleich der Waldmasken veranschaulicht die unterschiedliche Waldflächenerkennung der beiden Sensoren. Die höhere Auflösung der QuickBird-Daten tritt an den Grenzen zwischen den Objektklassen Wald und Nichtwald durch eine detailliertere Erkennung hervor (siehe Abb. 6.9). Dadurch wird eine genauere Abgrenzung möglich und der von der Landsat-Maske bekannte „Stufen“-Effekt ist deutlich reduziert. Auf Grundlage des Differenzbildes wurde eine Übersicht der aus den Waldmasken resultierenden Flächen erstellt (Tabelle 6.39). Die Summe der Differenzflächen beider Masken beträgt insgesamt 3,63 %. Sie setzt sich zusammen aus 1.340 ha Wald, der nur in der Landsat 7-Waldmaske als Wald erkannt wurde, und 764 ha Wald, der nur von der QuickBird-Waldmaske als Wald ausgewiesen wurde. Daraus geht hervor, dass die Landsat 7-Waldmaske eine größere Waldfläche erkennt. Dies ist einerseits auf die niedrigere Auflösung der Daten zurückzuführen, aber auch durch Änderungen von Landnutzungsformen zwischen den Aufnahmezeitpunkten der Satellitenszenen bedingt (siehe Kapitel 6.5.6). Insgesamt liefert die QuickBird-Waldmaske die höhere Gesamtgenauigkeit und damit eine präzisere Abbildung des BWI-Waldes.

	Gesamtfläche	Waldfläche Landsat 7- Waldmaske	Waldfläche QuickBird- Waldmaske	Differenz der Waldflächen	Summe der Differenzflächen beider Waldmasken
Anzahl Pixel	73.986.843	64.272.509	63.537.430	735.079 (0,99 %)	2.683.645 (3,63 %)
Fläche in ha	58.006	50.390	49.813	576 (0,99 %)	2.104 (3,63 %)

Tabelle 6.39: Waldfläche der Landsat 7- und QuickBird-Waldmaske, UG Pfälzerwald

### 6.5.8 Zusammenfassende Bewertung der Holzboden- und Waldmasken

In den Tabellen 6.40 bis 6.42 sind die in den vorausgegangenen Abschnitten 6.5.1 bis 6.5.7 dargelegten Ergebnisse der basierend auf verschiedenen Satellitendaten ermittelten Waldflächen und deren Genauigkeitsanalyse zusammengefasst. Eine Gegenüberstellung der aus der Bundeswaldinventur, den Waldmasken und den Vegetationslayern der Topographischen Karten



**Abbildung 6.9:** Sensorenvergleich anhand eines Ausschnittes des UG Pfälzerwald der Landsat 7- (a) und QuickBird-Waldmaske (b) (grün - Wald, schwarz - Nichtwald) sowie des panchromatischen QuickBird-Kanals (c)

abgeleiteten Waldflächen ist in Tabelle 6.40 zu finden. Die Waldflächen der Waldmasken liegen innerhalb des Konfidenzintervalls mit Ausnahme des UG Westliches Mittelgebirge. Die durch die BWI ermittelten Waldflächen sind größer als die der Waldmasken und des Vegetationslayers der TK. Die einzige Ausnahme ist hier das UG Pfälzerwald, in dem die Waldmaske zu einer Waldfläche führte, die um 0,11 % über der BWI-Waldfläche liegt.

Aus Tabelle 6.41 wird ersichtlich, dass alle Waldmasken innerhalb des Vertrauensintervalls nach FREUND (1992) mit Konfidenzniveau von 95 % liegen. Die mit den BWI-Traktecken als Referenzdaten ermittelten Gesamtgenauigkeiten der Landsat 7-Waldmasken reichen von 92,46 % bis 96,01 %, während die QuickBird-Waldmaske eine Genauigkeit von 96,39 % erreicht. Mit der Verwendung der PanQB-Referenzdaten bzw. den Aufnahmen des Biosphärenreservates (BR) und der BWI-Traktecken steigt diese Genauigkeit auf 97,71 %.

Aus den in Tabelle 6.42 dargelegten Genauigkeitsangaben geht hervor, dass die Genauigkeiten der Landsat 5-Holzbodenmasken niedriger als die der Landsat 7-Masken sind. Ebenfalls ersichtlich ist die aus der Adaption der Holzbodenmasken an die BWI-Walddefinition resultierende Genauigkeitssteigerung (Tabellen 6.42 und 6.41).

Datengrundlage	Gesamtfläche (ha)	Waldfläche (ha)	Waldanteil (%)	Stichprobenfehler BWI	Konfidenzintervall (Konfidenzniveau 68%)
Vegetationslayer (TK) UG1	806.834	413.046	51,19%		
Waldmaske UG1	806.834	426.134	52,82%	3,10%	[444.889, 473.355]
BWI-Wald UG1	806.834	459.122	56,90%		
Vegetationslayer (TK) UG2	964.685	347.856	36,06%		
Waldmaske UG2	964.685	343.633	35,62%	4,40%	[336.672, 367.662]
BWI-Wald UG2	964.685	352.167	36,51%		
Vegetationslayer (TK) UG3	498.016	141.126	28,34%		
Waldmaske UG3	498.016	140.975	28,31%	5,40%	[139.808, 155.770]
BWI-Wald UG3	498.016	147.789	29,68%		
Vegetationslayer (TK) UG4	390.412	210.073	53,81%		
Waldmaske UG4	390.412	231.860	59,39%	4,60%	[223.777, 245.357]
BWI-Wald UG4	390.412	234.567	60,08%		
Vegetationslayer (TK) UG5	358.480	194.740	54,32%		
Waldmaske UG5	358.480	196.454	54,80%	2,70%	[190.775, 201.363]
BWI-Wald UG5	358.480	196.069	54,69%		

**Tabelle 6.40:** Vergleich der Waldflächen der BWI, der fernerkundungsbasierten Waldmasken (Landsat 7) und des Vegetationslayers der Topographischen Karte (TK) für die Untersuchungsgebiete Westliches Mittelgebirge (UG 1), Nordostdeutschland (UG 2), Sachsen (UG 3), Alpen (UG 4) und Pfälzerwald (UG 5)

Waldmaske des Untersuchungsgebietes	Referenzdaten	Gesamtgenauigkeit	Vertrauensintervall nach FREUND (1992)		Kappa-Koeffizient
			untere Grenze	obere Grenze	
Westliches Mittelgebirge	BWI	92,75%	91,71%	93,68%	0,85
Nordostdeutschland	BWI	96,01%	95,38%	96,56%	0,91
Sachsen	BWI	95,47%	94,58%	96,23%	0,89
Alpen	BWI	92,46%	90,61%	93,97%	0,84
Pfälzerwald (Landsat 7)	BWI	95,17%	94,41%	95,83%	0,90
Pfälzerwald (QuickBird)	PanQB	95,75%	93,80%	97,10%	0,91
Pfälzerwald (QuickBird)	BWI	96,39%	94,54%	97,62%	0,86
Pfälzerwald (QuickBird)	BWI + BR	97,71%	96,59%	98,47%	0,86

**Tabelle 6.41:** Übersicht zu Gesamtgenauigkeiten, Kappa-Koeffizienten und Vertrauensintervallen nach FREUND (1992) mit Konfidenzniveau von 95 % für Landsat 7- und QuickBird-Waldmasken (Referenzdaten: BWI-Traktecken bzw. PanQB-Referenzdaten bzw. Aufnahmen des Biosphärenreservates (BR))

Holzbodenmaske des Untersuchungsgebietes	Sensor	Gesamtgenauigkeit	Kappa-Koeffizient
Westliches Mittelgebirge	Landsat 5	88,89%	0,77
Westliches Mittelgebirge	Landsat 7	92,08%	0,84
Nordostdeutschland	Landsat 7	95,70%	0,90
Sachsen	Landsat 7	94,94%	0,88
Alpen	Landsat 5	91,56%	0,83
Alpen	Landsat 7	91,73%	0,83
Pfälzerwald	Landsat 5	93,92%	0,88
Pfälzerwald	Landsat 7	94,97%	0,90

**Tabelle 6.42:** Übersicht zu den Gesamtgenauigkeiten und Kappa-Koeffizienten der Landsat 5- und Landsat 7-Holzbodenmasken mit BWI-Traktecken als Referenzdaten

## 6.6 Veränderungsrechnung

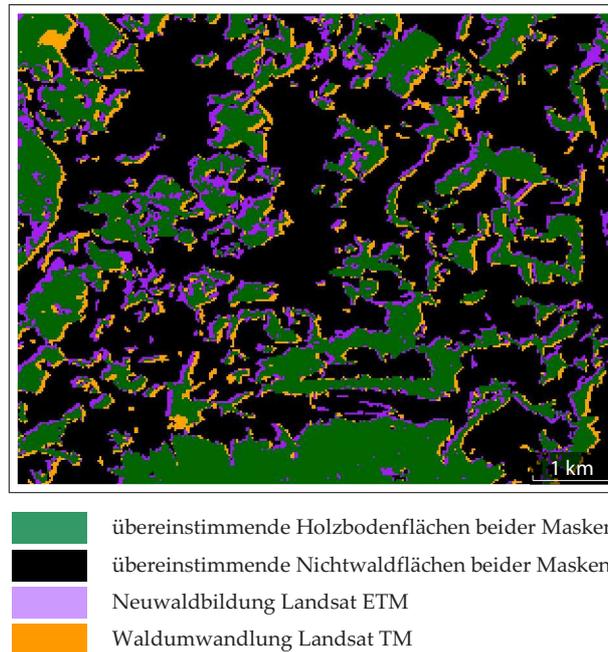
Beim Versuch, die Veränderung der Waldfläche zwischen der BWI I und der BWI II in einer Veränderungsrechnung zu dokumentieren, stellt sich die Frage, ob dafür die Holzboden- oder die Waldmaske die geeignetere Grundlage ist. Änderungen der Waldfläche laut BWI-Definition sind zwar durch die Waldmaske besser dargestellt (siehe Kapitel 5.5.3), aber für die Landsat 5-Szenen fehlen Zusatzdaten, die für eine Adaption der Holzbodenmaske an die BWI-Walddefinition notwendig sind. Daher wurden die angepassten Holzbodenmasken mit höchstem Adaptionsniveau für beide Datensätze (Landsat 5 und Landsat 7) für die Veränderungsrechnung ausgewählt, welches den Masken mit eliminierten Kleinstholzbodenflächen entspricht.

Bei der Betrachtung der Änderungsflächen sind u.a. folgende systematische Fehler zu verzeichnen:

- Durch Lageabweichungen hervorgerufene Verschiebungen von Waldgebieten. Diese Anomalie äußert sich zum Beispiel sehr auffällig durch Waldumwandlungsflächen im Osten eines Waldgebietes und Neuwaldbildungsflächen im Westen desselben Waldgebietes. Mit Zunahme der Waldaußengrenzen im Verhältnis zur Waldfläche steigt der daraus resultierende Fehler. Da der Lageversatz nicht gleichmäßig auftritt, ist eine Korrektur und quantitative Abschätzung dieses Fehlers schwierig (siehe Abb. 6.10).
- Fehlklassifizierungen, die sich nicht fortsetzen, erscheinen als Änderungsflächen (z.B. ein fälschlicherweise als Holzboden klassifiziertes Feld der Landsat 5-Maske wird in der Landsat 7-Maske korrekterweise als Nichtwald deklariert und somit der Waldumwandlungsfläche zugewiesen).

Diese beiden Fehler führen damit zu einer systematischen Überschätzung der Veränderungsflächen.

Die Ergebnisse der Veränderungsrechnung (Tabelle 6.43) zeigen, dass die Waldfläche in den drei Untersuchungsgebieten zwischen den Aufnahmezeitpunkten zugenommen hat. Durch die



**Abbildung 6.10:** Einfluss von Lageabweichungen der Satellitenbilder auf die Veränderungsrechnung

	Holzboden Landsat 5	Holzboden Landsat 7	Waldumwandlung		Neuwaldbildung		Bilanz	
UG1 (Fläche in ha)	413.944	415.354	43.468	10,50%	44.879	10,84%	1.411	0,34%
UG4 (Fläche in ha)	222.940	224.383	16.866	7,57%	18.309	8,21%	1.443	0,65%
UG5 (Fläche in ha)	186.216	197.685	4.985	2,68%	16.453	8,84%	11.468	6,16%

**Tabelle 6.43:** Veränderungsrechnung für die Untersuchungsgebiete Westliches Mittelgebirge (UG1), Alpen (UG4) und Pfälzerwald (UG5)

Bilanz wird die aufgrund der oben beschriebenen systematischen Fehler überdimensionierte Flächengröße der Waldumwandlungen und Neuwaldbildungen der Untersuchungsgebiete Westliches Mittelgebirge und Alpen weitestgehend ausgeglichen.

Abweichend davon sind die im UG Pfälzerwald beobachteten Veränderungen zu interpretieren. Der Anteil der Waldumwandlungen ist im Gegensatz zu den Neuwaldbildungen sehr gering, so dass die daraus resultierende Bilanz mit 6,16 % auffallend groß ist. Die Waldumwandlungsflächen haben im Vergleich zu denen der anderen Untersuchungsgebiete mit 4.985 ha einen geringen Anteil. Umgekehrt dazu verhält sich die Flächenentwicklung des Neuwaldes, mit der die Holzbodenfläche um 16.453 ha zunimmt. Die Untersuchung dieses Sachverhaltes zeigte, dass die „Neuwaldflächen“ überwiegend kleine Flächen sind, die sowohl innerhalb geschlossener als auch ausserhalb von Waldgebieten liegen und mit den Landsat 5-Daten nicht als Holzbodenfläche erfasst wurden. Somit führt dieser Klassifizierungsfehler zur Überschätzung der Neuwaldentwicklung.

Für eine sinnvolle Abbildung der Holzboden- und Veränderungsflächen des UG Westliches Mittelgebirge wurde die „Wolkenmaske“ auch für die Landsat 5-Daten angewendet. Somit wurden 10.317 ha als von Wolken überdecktes Gebiet deklariert, die noch zur Holzboden- oder Nichtwaldfläche hinzukommen und dementsprechend in die Veränderungsrechnung zu integrieren sind. Die auffallend hohe Anzahl der Veränderungsflächen ist vor allem im Norden des Untersuchungsgebietes zu finden, denn das Aufnahmedatum der Nordszene der Landsat 5- und 7-Daten fällt in den Monat Mai, so dass die klassifizierten landwirtschaftlichen Flächen zwischen den Zeitpunkten variieren können und als Veränderungen ausgewiesen werden.

## 7 Kostenübersicht

Entscheidend für die Etablierung eines Verfahrens sind unter anderem die damit verbundenen Kosten für die Beschaffung und Auswertung der Daten. Eine umfassende und bis ins Detail verbindliche Kalkulation der Kosten für eine aus terrestrischen und Fernerkundungsdaten kombinierte, deutschlandweite Bundeswaldinventur ist nicht möglich, da eine Vielzahl von Einflussgrößen derzeit nicht bekannt sind und daher nicht beurteilt werden können. Dazu zählen:

- Prozessierungslevel der Satellitendaten
- Kosten für Satellitendaten und digitale Zusatzdaten sind aktuellen Preisentwicklungen unterworfen und deshalb nicht konstant
- Aufwand für die Prozessierung der Satellitendaten ist abhängig vom auszuwertenden Gebiet und kann regional schwanken
- Dauer einzelner Arbeitsschritte ist abhängig von der Auflösung der Daten, Größe des auszuwertenden Gebietes und der verwendeten Hard- und Software
- Verfügbarkeit und Kosten von Referenzdaten zur Verifizierung (Erhebung im Gelände, Orthofoto)
- Kontinuität der Bereitstellung von Satellitendaten ist nicht gegeben, beispielsweise ist die Sensorfunktionalität von Landsat 7 seit 2003 stark beeinträchtigt, so dass auf andere Daten zugegriffen werden muss. Der damit verbundene Aufwand für die Auswertung der Daten lässt sich nur unzureichend voraussagen.

Die nachfolgenden Aufstellungen enthalten eine Aufschlüsselung des Arbeitsaufwandes, der für die Durchführung des entwickelten Verfahrens zur Waldmaskenerstellung einzuplanen ist. Dabei wird davon ausgegangen, dass die in Kapitel 3.1 beschriebenen Daten vorliegen. Unberücksichtigt bleiben notwendige Datenaufbereitungsprozeduren mit teilweise erheblichem Arbeits- und Zeitaufwand, wie die Aufbereitung der Orthofotos, die jedoch nicht im Verfahren zur Waldmaskenerstellung integriert sind, und die Verfahrensentwicklung selbst. Eine Abschätzung der Kosten für die Waldmaskenerstellung ergibt sich durch die Annahme einer durchschnittlichen Vergütung von 27 Euro/Stunde (Arbeitgeberbrutto).

Wie bereits erwähnt, beziehen sich die in Tabelle 7.1 genannten Auswertezeiten auf die Daten, die dem Projekt mit entsprechendem Prozessierungslevel zur Verfügung standen. Bei einer Waldmaskenerstellung auf der Basis von unbearbeiteten Satellitendaten („Rohdaten“) sind die entsprechenden Datenaufbereitungszeiten hinzuzurechnen. Wird eine Waldmaske aus mehreren Satellitenszenen erstellt, dann sind die Zeiten der Arbeitsschritte 1 bis 3 dementsprechend

Arbeitsschritte	Bemerkung	Zeitbedarf (h)	Kosten (EUR)
(1) Vorbereitung Satellitendaten	Einlesen der Daten, geometrische und radiometrische Beurteilung der Daten, Berechnung NDVI	5	135
(2) Signaturanalyse	Selektion relevanter Trakteckeninformationen aus BWI-Datenbank, Extraktion & Aufbereitung der Spektralwerte	6	162
(3) Waldmaskenerstellung	Erstellung der Holzbodenmaske, ggf. Mosaikierung zu Gesamtholzbodenmaske	6	162
(4) Adaption der Holzbodenmaske an BWI-Definition	Eliminierung Kleinstholzbodenflächen, ATKIS-Auszug, regelbasierte Anpassung der Holzbodenmaske an BWI-Definition, Lageanpassung der Waldmaske	12 (+ 24 h reine Rechenzeit)	324
(5) Verifizierung	Genauigkeitsbewertung	8	216
		<b>Σ 37</b>	<b>Σ 999</b>

**Tabelle 7.1:** Arbeitsaufwand und Kosten für eine an die BWI-Walddefinition angepasste Waldmaskenerstellung basierend auf einer Landsat-Szene (31.450 km<sup>2</sup>)

zu vervielfachen. Der hohe Zeitbedarf für die Adaption der Waldmasken an die BWI-Definition ergibt sich unter anderem aus komplexen Verschneidungen zwischen Raster- und Vektordaten, die mittels der Software ERDAS Imagine umgesetzt wurden. Möglicherweise ist ERDAS Imagine nicht das geeignete Programm zur Bearbeitung von Vektordaten, so dass durch den Einsatz einer anderen Software die Verarbeitungszeit zur Verschneidung der Daten verringert werden könnte.

Die Auswertung der QuickBird-Daten erfolgte mit einem methodisch anderen Ansatz, mit dem ein höherer Zeitbedarf für die Arbeitsschritte der Signaturanalyse und Verifizierung verbunden ist (Tabelle 7.2).

Zum Vergleich sind in Tabelle 7.3 die Kosten für Orthokorrekturen von Landsat- und QuickBird-Daten der Firma Euromap<sup>1</sup> zusammengefasst. Die Kosten für die Landsat-Daten basieren auf einer Landsat-Vollszene, was einer Fläche von 31.450 km<sup>2</sup> entspricht. Für die Abdeckung Deutschlands mit Landsat-Daten werden nach IOST ET AL. (2006) 27 Vollszene benötigt. Die QuickBird-Kosten für Deutschland beziehen sich auf eine Flächengröße von 357.022 km<sup>2</sup>. Das für die Orthokorrektur benötigte Referenzmaterial, wie beispielsweise Höhenmodelle, und anfallende Prozessierungsarbeiten sind nicht in den Preisen enthalten, können aber vom Anbieter bereitgestellt werden. Beleuchtungskorrekturen werden derzeit noch nicht als gängige Serviceleistungen angeboten, so dass dafür keine Kostenabschätzungen möglich sind.

Aus der Gegenüberstellung der Kosten für die beiden Verfahren zur Waldmaskenerstellung (Tabelle 7.4) wird deutlich, dass die Daten mit der höheren Auflösung insgesamt höhere Kosten verursachen. Dies resultiert aus dem daten- und verfahrensbedingten Zeitbedarf, zu dem im Weiteren die Datenkosten hinzukommen. Allerdings werden mit den höher aufgelösten Daten

<sup>1</sup><http://www.euromap.de>, Stand: März 2005

Arbeitsschritte	Details	Zeitbedarf (h)	Kosten (EUR)
(1) Vorbereitung Satellitendaten	Einlesen der Daten, geometrische und radiometrische Beurteilung der Daten, Berechnung NDVI	7	189
(2) Signaturanalyse	Verteilung und visuelle Interpretation der PanQB-Referenzdaten, Extraktion & Aufbereitung der Spektralwerte	18	486
(3) Waldmaskenerstellung	Erstellung der Holzbodenmaske	6	162
(4) Adaption der Holzbodenmaske an BWI-Definition	Eliminierung Kleinstholzbodenflächen, ATKIS-Auszug, regelbasierte Anpassung der Holzbodenmaske an BWI-Definition, Lageanpassung der Waldmaske	12 (+ 24 h reine Rechenzeit)	324
(5) Verifizierung	Selektion und Aufbereitung der BWI-Referenzdaten, Genauigkeitsbewertung	12	324
		$\Sigma$ 55	$\Sigma$ 1485

**Tabelle 7.2:** Arbeitsaufwand und Kosten für eine an die BWI-Walddefinition angepasste Waldmaskenerstellung basierend auf QuickBird-Daten (581 km<sup>2</sup>)

Arbeitsschritte	Bemerkung	Kosten (EUR)	
		je km <sup>2</sup>	Gesamtdeutschland
Orthokorrektur Landsat	panchromatisch, Auflösung: 15 m	0,029	24.300
Orthokorrektur Landsat	multispektral, Auflösung: 20 m	0,021	17.550
Orthokorrektur Landsat	merge, Auflösung: 10 m	0,033	28.350
Orthokorrektur QuickBird	panchromatisch	12,000	4.284.264
Orthokorrektur QuickBird	multispektral	10,000	3.570.220
Orthokorrektur QuickBird	pan-sharpend	15,000	5.355.330

**Tabelle 7.3:** Kosten für die Orthokorrektur für Landsat- und QuickBird-Daten der Firma Euromap (Stand: März 2005)

bessere Genauigkeiten erreicht und neben der Klassifizierung von Wald- und Nichtwaldflächen bieten die QuickBird-Daten vielfältiges Potential für weitere Stratifizierungen. Im Vergleich zu den Gesamtkosten der Bundeswaldinventur betragen die Kosten der Waldmaskenerstellung mit Landsat-Daten 0,3 % und mit QuickBird-Daten 43 %. Bei diesem Kostenvergleich ist zu berücksichtigen, daß mit der Waldmaskenerstellung nur ein Wald/Nichtwaldentscheid getroffen wird. Der Großteil der Kosten entsteht dabei durch den Erwerb von Satellitendaten. Im Gegensatz dazu wurden mit der zweiten Bundeswaldinventur 150 Merkmale erhoben, womit eine höhere Informationstiefe bereitgestellt wird. Weiterführende Angaben zu Zeit- und Kostendaten sind in den Arbeiten von RIEDEL (2006) und IOST ET AL. (2006) zu finden.

Verfahren	Kosten (EUR)		Gesamtkosten (EUR)
	Waldmaskenerstellung	Kosten (EUR) Satellitendaten	
Waldmaskenerstellung Landsat	11.341	40.500	51.841
Waldmaskenerstellung QuickBird	912.526	7.140.440	8.052.966
BWI			18.629.000

**Tabelle 7.4:** Kosten für die Verfahren der Waldmaskenerstellung für das gesamte Bundesgebiet im Vergleich zu den BWI-Gesamtkosten

## 8 Diskussion und Fazit

Das Ziel dieser Arbeit war es, die Walddefinition der Bundeswaldinventur unter Verwendung von Erdbeobachtungsdaten zu reproduzieren. Im Gegensatz zu anderen Fernerkundungsprojekten waren die Untersuchungsgebiete gemäß den Anforderungen einer Großrauminventur großflächig angelegt, was deren Flächenanteil von 30.850 km<sup>2</sup> zeigt, der 8,6 % der Gesamtfläche Deutschlands entspricht. Bei der Auswahl der Gebiete wurden verschiedene Kriterien berücksichtigt, um den Anforderungen einer deutschlandweiten Walderhebung gerecht zu werden. Dadurch sind die Voraussetzungen für eine realistische Beurteilung der Machbarkeit und für die Übertragbarkeit eines kombinierten Verfahrensvorschlages aus terrestrischen Daten und satellitengestützter Erdbeobachtung zur Klassifizierung in Wald- und Nichtwaldflächen für ganz Deutschland gegeben.

### Verifizierungsverfahren

Die Validierung der Klassifizierungsergebnisse dient der Bewertung der Holzboden- und Waldmasken und demzufolge auch des gesamten Verfahrens der Waldmaskenerstellung. Aufgrund deren zentraler Bedeutung sind die Verifizierungsverfahren ein Schwerpunkt der Arbeit. Voraussetzung für eine effektive Genauigkeitsbewertung sind präzise und zweckentsprechende Referenzdaten, denn deren Qualität beeinflusst direkt die Aussagekraft der ermittelten Genauigkeiten. Ungenaue oder ungeeignete „ground truth“-Informationen können zu inkorrekten Bewertungen führen.

So wurden für ein und dieselbe Holzbodenmaske des Untersuchungsgebietes Sachsen verschiedene Verifizierungsverfahren eingesetzt, um einen Genauigkeitsvergleich durchzuführen und letztlich das geeignete Verfahren auszuwählen. Die Genauigkeiten lagen zwischen 92,09 % bei der Verwendung von Orthofotos und 97,49 % beim Einsatz der sicheren BWI-Traktecken als Referenz. Dabei repräsentiert das jeweils dargestellte Verifizierungsergebnis die Übereinstimmung der Klassifizierung mit den verwendeten Referenzdaten. Gesucht war das Verifizierungsverfahren, welches den Grad der Übereinstimmung zwischen Waldmaske und dem tatsächlichen Wald laut BWI-Definition am besten ermittelt. Die diesem „Zielobjekt“ entsprechenden Referenzdaten sind die BWI-Traktecken. Mit der Wahl einer Untermenge der BWI-Daten, z.B. nur der sicheren Traktecken, können Verzerrungen der Genauigkeitsanalyse entstehen, so dass sich die Berücksichtigung aller BWI-Traktecken als Referenzdaten als zuverlässige Variante sowohl für die Verifizierung der Holzbodenmaske als auch der an die BWI-Definition adaptierten Waldmaske herausgestellt hat. Des Weiteren sprechen für dieses Verfahren die hohe Anzahl der zur Verfügung stehenden Referenzpunkte und die Kostenneutralität.

## Waldmaskenerstellung und Genauigkeiten

Die Wahl des Klassifizierungsansatzes zur Extraktion von Waldflächen war von vornherein durch verschiedene Anforderungen eingeschränkt. Dazu zählen unter anderem die große Fläche der Untersuchungsgebiete, mit denen in Abhängigkeit von den Satellitensystemen enorme Datenmengen verbunden sind, das vorhandene digitale Zusatzdatenmaterial und die vorliegenden Inventurdaten. Weitere Verfahren, wie die kNN-Methode, Logistische Regressionsmodelle aber auch Area Frame Sampling wurden im Rahmen des Projektes „Weiterentwicklung der Bundeswaldinventur durch Integration von Erdbeobachtungsdaten“ untersucht (IOST ET AL. (2006)). Für die Unterscheidung in die Landbedeckungsarten Wald und Nichtwald wurde ein iteratives Schwellenwertverfahren entwickelt, welches im Gegensatz zu anderen Klassifizierungsverfahren mit einem geringen Arbeits- und Rechenaufwand verbunden ist und gute bis sehr gute Klassifizierungsergebnisse erreichte, die für die aus den Landsat 7- und QuickBird-Satellitenszenen abgeleiteten Waldmasken zwischen 92,46 % und 97,71 % liegen.

Die Verifizierung der Landsat 5-Holzbodenmasken ergab Genauigkeiten zwischen 88,89 % und 93,92 %, während die Genauigkeiten derselben Untersuchungsgebiete der Landsat 7-Daten zwischen 91,73 % und 94,97 % liegen. Die niedrigeren Genauigkeiten der Landsat 5-Masken können auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden, zu denen u.a. die Georeferenzierung der Satellitendaten mit maximalen Lageabweichungen von bis zu  $\pm 75$  m, der Aufnahmezeitpunkt der Szenen und die teilweise geringere Anzahl der zur Verifizierung verwendeten Referenzdaten der ersten Bundeswaldinventur zählen. Gegenüber den Holzbodenmasken war ein weiterer Anstieg der Gesamtgenauigkeit bei der Validierung der Waldmasken festzustellen, die zu Ergebnissen zwischen 92,46 % und 96,01 % führte. Diese weitere Steigerung der Genauigkeit steht im Zusammenhang mit der besseren Übereinstimmung des Referenzdatenmaterials und der Waldmaske.

Ein interessanter Ansatz ist die Beobachtung der Entwicklung von Waldflächen über Raum und Zeit. Ausgehend von terrestrischen Inventurdaten und Satellitenszenen zwei verschiedener Aufnahmezeitpunkte konnten die an eine Veränderungsrechnung von Waldflächen gestellten Anforderungen nicht in ausreichendem Maß erfüllt werden. Aufgrund des vorliegenden Datenmaterials, welches keine Adaption der Landsat 5-Holzbodenmasken ermöglichte, konnten anstelle von Waldmasken nur die Änderungen der Holzbodenmasken detektiert werden. Dadurch war ein direkter Vergleich zu den durch die BWI ermittelten Veränderungen der Waldfläche von rund 0,2 % in den alten Bundesländern von 1987 bis 2002 ausgeschlossen. Es hat sich gezeigt, dass die präzise Bestimmung von Veränderungen nur mit deckungsgleichen Daten möglich ist. Dazu werden Originaldaten benötigt, die exakt aufeinander referenziert sind. Ebenso ist eine akkurate Klassifizierung der Satellitendaten unerlässlich, da Klassifizierungsfehler zur fehlerhaften Veränderungsbewertung beitragen. Im Weiteren sollten für eine multitemporale Veränderungsrechnung Szenen gewählt werden, bei denen eine Trennung zwischen Wald und Nichtwald realisierbar ist. Optimal wären hierfür Satellitenszenen, die innerhalb und außerhalb der Vegetationsperiode aufgenommen wurden, um eine Unterscheidung zwischen Wald und dem Wald ähnlicher Signaturen, wie landwirtschaftlichen Flächen, zu unterstützen.

Aus dem Vergleich der Sensoren QuickBird und Landsat 7 mittels der BWI-Referenzdaten

geht die QuickBird-Waldmaske durch die höhere Verifizierungsgenauigkeit von 96,39% und somit auch adäquatere Abbildung des BWI-Waldes als bessere hervor, was unter anderem auf die höhere Auflösung und die daraus resultierende Detailschärfe der QuickBird-Daten zurückzuführen ist. Die Stärken des hochauflösenden Sensors kommen insbesondere bei kleinräumigen Auswertungen zum Tragen, wie bei der Detektierung von Freiflächen minimaler Ausdehnung oder der exakten Erkennung von Waldrändern. Der Wald-/Nichtwaldentscheid schöpft das Potential der QuickBird-Daten nicht aus, so dass für eine umfassende Bewertung dieses Sensors auf andere Arbeiten verwiesen werden muss, beispielsweise FÖRSTER (2006), MARX (2006), LANG und LANGANKE (2006) und FRICK (2006). Die fernerkundungsbasierte Auswahl unabhängiger Signaturen über den panchromatischen QuickBird-Kanal ist ein methodisch neuer Ansatz, für den keinerlei Zusatzinformationen benötigt werden. Obgleich das damit verbundene Verfahren zur Waldmaskenerstellung arbeitsintensiver ist, können durch diese Methode der Signaturextraktion systematische Fehler durch Lageabweichungen oder zeitliche Differenz der Ausgangsdaten ausgeschlossen werden. Zudem bietet sich beim Einsatz der terrestrischen Inventurdaten nunmehr die Möglichkeit einer weitestgehend unverzerrten Verifizierung. Bei großräumigen Inventuren, beispielsweise deutschland- oder europaweiten Auswertungen, sollte die Auflösungsebene des Untersuchungszweckes mit der Wahl der Daten gekoppelt sein, da die mit einer auf QuickBird-Daten basierten Auswertung verbundene Datenmenge eine enorme technische Herausforderung darstellt. Für einen Wald-/Nichtwaldentscheid könnten auch hochauflösende Daten, wie IRS-P6 oder Spot-4-Daten, ausreichende Ergebnisse liefern.

## Walddefinition

Eine Schwierigkeit bei der Waldmaskenerstellung über Satellitenbilder ist die Ausweisung von unbestockten Holzbodenflächen und Nichtholzboden-Flächen als Wald. Die Erfassung baumbestockter Gebiete ist aufgrund ihrer spektralen Eigenschaften durchaus realisierbar, während alle anderen zum BWI-Wald gehörenden Flächen nur durch Zusatzdaten in eine Waldmaske integriert werden können. Dieser Prozess wird durch die begriffliche Abgrenzung des BWI-Waldes, die teilweise verschieden interpretierbar ist, erschwert. Beispielsweise sind zu Blößen und Nichtholzbodenflächen, zu denen u.a. „Wildwiesen und Wildäcker, ... im Wald gelegene Felsen, Blockhalden, Kiesflächen und Gewässer“ (BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2000)) zählen, keine Angaben zur maximalen Flächengröße zu finden. Den Bundesländern hingegen obliegt es, ob sie landesspezifische Besonderheiten in die Walddefinition aufnehmen oder ausschließen (KLOSE und ORF (1998)).

Neben den Unterschieden auf nationaler Ebene ist die BWI-Waldfläche mit der Waldfläche anderer internationaler Waldinventuren nicht ohne Weiteres vergleichbar, denn die Walddefinitionen der einzelnen Länder weichen voneinander ab oder berücksichtigen unterschiedliche Kriterien, da sie sich entweder an der FAO oder an nationalen Definitionen orientieren (KÖHL ET AL. (2000)). Deshalb ist die Harmonisierung des Waldbegriffes und auch der Waldinventuren, die sowohl auf europäischer Ebene<sup>1</sup> als auch weltweit (FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (2005)) angestrebt wird, ein bedeutender Schritt, der unter

<sup>1</sup><http://www.metla.fi/eu/cost/e43/>, Stand: November 2005

anderem zum effizienten Einsatz von Fernerkundungsmethoden auf dem Sektor der forstlichen Inventuren beitragen kann.

## **Fazit**

Der entwickelte Verfahrensvorschlag zur satellitengestützten Waldflächenkartierung für die Bundeswaldinventur ermöglicht eine großflächige Abbildung der aktuellen Waldbedeckung, angefangen bei der Signaturextraktion aus dem Satellitenbild bis hin zur Verifizierung und Fehleranalyse der Waldmasken. Mit der weitestgehend automatisiert erstellten Holzbodenmaske werden grundsätzlich alle von Bäumen bestockten Flächen dargestellt. Entsprechend den jeweiligen Anforderungen kann dieses Datenprodukt angepasst werden, so dass damit auch Waldmasken nach anderen Definitionen erstellt werden können. Im Vergleich zur terrestrischen Inventur birgt dieser kombinierte Ansatz ein qualitativ anderes Verfahren, welches neben Stärken allerdings auch Schwächen aufweist. Positiv zu bewerten sind die anstelle der Punktdaten erreichten flächigen Informationen für die entsprechenden Gebiete, durch die weitere Verschneidungen mit anderen Daten möglich sind, die Aktualität der Informationen, der hohe Automatisierungsgrad des Verfahrens und die integrierte Verifizierung. Dagegen sprechen die Abhängigkeit von der zeitnahen Verfügbarkeit und Qualität der Satellitendaten und die geringere Informationstiefe hinsichtlich des bei der terrestrischen Inventur erhobenen Datenermaterials.

Mit der Ableitung der Waldfläche aus Satellitendaten wird ein zentrales Attribut der Bundeswaldinventur ermittelt, da viele Inventurgrößen über die Fläche hergeleitet werden. Die Methode der satellitengestützten Waldflächenerfassung liefert reproduzierbare Ergebnisse, womit auch über lange Zeiträume ein Vergleich von Waldflächen möglich ist. Aufgrund der Flexibilität des Verfahrens können verschiedene Datenquellen integriert werden, wodurch dieses besonders hinsichtlich der zunehmenden Verfügbarkeit von georeferenzierten, flächendeckenden Daten zu empfehlen ist. Obwohl die BWI-Waldflächendefinition nicht speziell für die Herleitung von Waldflächen aus Fernerkundungsdaten konzipiert ist, werden diese mit hoher Genauigkeit erfasst. Zudem ist die Möglichkeit zur Erstellung von Zwischenberichten gegeben, deren aktuelle Informationen beispielsweise in die Klimaberichterstattung einfließen können. Ein positiver Synergieeffekt ist dabei die Aktualisierung der Daten der Bundeswaldinventur zwischen den regulären Inventuraufnahmen. Auch wenn eine terrestrische Waldinventur hinsichtlich der erhobenen Merkmale nicht durch eine Inventur auf Basis von Satellitendaten ersetzt werden kann, ist eine Steigerung der Effizienz durch den Einsatz der Fernerkundungsdaten zur Stratifizierung des Inventurgebietes möglich. Werden durch den Einsatz eines kombinierten Inventurverfahrens die terrestrischen Stichprobenpunkte reduziert, können gegebenenfalls Kosten eingespart werden.

## Abkürzungsverzeichnis

<b>AIF</b>	Adaptive Image Fusion
<b>ATKIS</b>	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
<b>BR</b>	Aufnahmen in den Kernzonen des Biosphärenreservates Pfälzerwald
<b>BKG</b>	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
<b>BMBF</b>	Bundesministerium für Bildung und Forschung
<b>BWI</b>	Bundeswaldinventur
<b>CCD</b>	Charge-coupled Device's
<b>CPU</b>	Central Processing Unit
<b>DGM</b>	Digitales Geländemodell
<b>DLM</b>	Digitales Landschaftsmodell
<b>DLR</b>	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
<b>DTK25</b>	Digitale Topographische Karte im Maßstab 1 : 25.000
<b>dGZ</b>	durchschnittlicher Gesamtwuchs
<b>ETM<sup>+</sup></b>	Enhanced Thematic Mapper
<b>FAO</b>	Food and Agriculture Organization of the United Nations
<b>HB</b>	bestockter Holzboden
<b>JRC</b>	Joint Research Center
<b>kNN</b>	k-Nächste-Nachbarn-Verfahren, auch k-nearest-neighbour
<b>LZW</b>	ein von 1985 bis 2004 patentgeschützter Algorithmus zur verlustfreien Datenkompression von Lempel, Ziv und Welch (LZW), der u. a. von den Dateiformaten GIF, TIFF, PDF und PostScript Level 2 verwendet wird
<b>MIR</b>	Mittleres Infrarot
<b>MLK</b>	Maximum-Likelihood-Klassifizierung
<b>ms</b>	multispektral

<b>MSS</b>	Multispectralscanner
<b>NIR</b>	Nahes Infrarot
<b>NDVI</b>	Normalized Difference Vegetation Index
<b>NN</b>	Normal Null
<b>RMSE</b>	Root Mean Square Error
<b>pan</b>	panchromatisch
<b>PanQB</b>	Referenzdaten, die über das von der QuickBird-Szene abgedeckte Untersuchungsgebiet Pfälzerwald verteilt wurden und deren Zuordnung in die Straten Wald oder Nichtwald durch visuelle Interpretation der panchromatischen QuickBird-Daten erfolgte
<b>PCA</b>	Principal Component Analysis = Hauptkomponentenanalyse
<b>Pixel</b>	Picture Element
<b>PC</b>	Principal Components = Hauptkomponenten
<b>TM</b>	Thematic Mapper
<b>TK</b>	Topographische Karte
<b>UG</b>	Untersuchungsgebiet bzw. -gebiete

## Literaturverzeichnis

- ALBERTZ, J. (2001): *Einführung in die Fernerkundung - Grundlagen der Interpretation von Luft- und Satellitenbildern*. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt, 2. überarbeitete und erweiterte Auflage, 249 Seiten.
- ALTMANN, D. G. (1991): *Practical Statistics for Medical Research*. London, 611 Seiten.
- BIRGER, J. (2002): *Multisensorale und multitemporale Fernerkundungsdaten zur Erfassung, Differenzierung und Veränderungsanalyse ausgewählter Vegetationsstrukturen der Bergbaufolgelandschaft Mitteldeutschlands*. Dissertation. URL: <http://sundoc.bibliothek.uni-halle.de/diss-online/02/03H016> (Stand: November 2004).
- BORDON, D. (1999): *Vegetations- und Totholzklassifizierung im Nationalpark Bayerischer Wald mit IRS-1C Daten*. Master-Arbeit, Bayerische Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Institut für Geographie.
- BORDON, D., GLASER, R., KEIL, M. und RALL, H. (2000): Vegetations- und Totholzklassifizierung im Nationalpark Bayerischer Wald anhand von IRS-1C-Daten. *Petermanns Geographische Mitteilungen* **144**(3): 18 – 25.
- BRASSEL, P. und LISCHKE, H. (Herausgeber) (2001): *Swiss National Forest Inventory: Methods and Models of the second Assessment*. WSL Swiss Federal Research Institute, 336 Seiten.
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2000): Allgemeine Verwaltungsvorschrift zur Durchführung der BWI II (VwV BWI II). *Bundesanzeiger* **52**(146 a).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2. Mai 1975): Gesetz zur Erhaltung des Waldes und zur Förderung der Forstwirtschaft (Bundeswaldgesetz). (BGBl. I S. 1037), zuletzt geändert durch Artikel 2 Abs. 1 des Gesetzes vom 26. August 1998 (BGBl. I S. 2521).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG UND LANDWIRTSCHAFT (HRSG.) (2001): Aufnahmeanweisung für die Bundeswaldinventur II (2001 - 2002), 2. korrigierte, überarbeitete Auflage, Mai 2001, Bonn.
- CAMPBELL, J. (1996): *Introduction to Remote Sensing*. Guilford Publications, 2. Auflage, 622 Seiten.
- CENTER FOR HEALTH APPLICATIONS OF AEROSPACE RELATED TECHNOLOGIES (2005): Current and Future Sensor Systems. URL: <http://geo.arc.nasa.gov/esdstaff/health/sensor/cfsensor.html> (Stand: Juni 2005).

- COENRADIE, B. (1992): *Waldklassifizierung und Totholzkartierung im Nationalpark Bayerischer Wald unter Verwendung von Landsat-TM- und digitalen Zusatzdaten*. DLR-Forschungsbericht (DLR-FB) 92-10, Oberpfaffenhofen.
- COENRADIE, B., HOFFMANN, K. und SAGISCHEWSKI, H. (2002): *Satellitendaten - Abschlussbericht zum Forschungsprojekt: Verbessertes Waldzustandsmonitoring mit MOMS-Priroda-Daten*. Landesforschungspräsidium Sachsen, Graupa, 164 Seiten.
- COLBY, J. D. (1991): Topographic Normalization in Rugged Terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **57**(5): 531 – 537.
- CONGALTON, R. G. (1991): A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data. *Remote Sensing of Environment* **37**: 35 – 46.
- DAHM, S. (1995): *Bundeswaldinventur - Auswertungsmodelle und Vorschläge zur Effektivitätssteigerung*. Dissertation, Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Hamburg.
- DEES, M. (1996): *Regressions- und Kleingebietschätzung bei forstlichen Großrauminventuren unter Nutzung von Forsteinrichtungs- und Satellitendaten, Mitteilungen der Abteilung Forstliche Biometrie, Freiburg*, Band 96.
- DEES, M., PELZ, D. und KOCH, B. (1998): Integrating Satellite Based Forest Mapping with Landsat TM in a Concept of a Large Scale Forest Information System. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* **4**: 209 – 220.
- DIGITAL GLOBE (2004): QuickBird Imagery Products - Product Guide. *Technischer Bericht Revision 4.3*, Digital Globe, Inc., 1900 Pike Road, Longmont, Colorado 80501.
- EKSTRAND, S. (1996): Landsat TM-Based Forest Damage Assessment: Correction for Topographic Effects. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **62**(2): 151 – 161.
- ENVIRONMENTAL REMOTE SENSING CENTER (2005): Satellite Systems: Past - Current - Future. The Nelson Institute - University of Wisconsin-Madison. URL: <http://www.ersc.wisc.edu/resources.php> (Stand: Juni 2005).
- EURIMAGE (2004): Nearest Neighbour Resampling - Technical Memo. *Technischer Bericht*, Eurimage SpA, Rome, Italy.
- EUROPEAN COMMISSION, DIRECTORATE GENERAL XII, SCIENCE, RESEARCH AND DEVELOPMENT (2000): ALPMON- Inventory of alpine-relevant parameters for an alpine monitoring system using remote sensing data, Final Report. *Technischer Bericht*, Joanneum Research, Institute of Digital Image Processing, Graz - Austria RSDE, R.S.D.E. Srl, Milano - Italy ALU, Department of Remote Sensing and Land Information Systems, Freiburg - Germany LMU, Institute for Landuse Planning and Nature Conservation, Department of Remote Sensing, Freising - Germany, Austrian Research Centre Seibersdorf, Department of Environmental Planning, Seibersdorf - Austria, WSL, Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, Birmensdorf - Switzerland SLU (Sub-contractor), Sachverständigenbüro für Luftbilddauswertung und Umweltfragen, Gräfelfing - Germany.

- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (Herausgeber) (2005): *Third expert meeting on harmonizing forest-related definitions for use by various stakeholders*, Rome. URL: <http://www.fao.org/forestry/foris/webview/forestry2/-index.jsp?siteId=6341&sitetreeId=25210&langId=1&geoId=0> (Stand: November 2005).
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS, FORESTRY DEPARTMENT (2004): Global forest resources assessment update 2005 - terms and definitions (final version). *Technischer Bericht Forest Resources Assessment Programme Working Paper 83*, Rome. URL: [http://www.fao.org/documents/show\\_cdr.asp?url\\_file=/docrep/007/ae156e/ae156e02.htm](http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/007/ae156e/ae156e02.htm) (Stand: November 2005).
- FRANZEN, M., SCHARDT, M. und SCHMITT, U. (1998): *Angewandte Geographische Informationsverarbeitung. Beiträge zum AGIT-Symposium Salzburg '98*, Wichmann Verlag Heidelberg, Kapitel Einsatz von hochauflösenden Satellitenbilddaten zum Aufbau und zur Aktualisierung des Digitalen Landschaftsmodells von Österreich - Objektklasse Wald. Seiten 316 – 325.
- FREUND, J. (1992): *Mathematical Statistics 5e*. Englewood Cliffs, N.J., Prentice-Hall.
- FRICK, A. (2005): Evaluation of Natura 2000 habitat types through very high resolution satellite imagery. In KLEINN, C., NIESCHULZE, J. und SLOBODA, B. (Herausgeber), *Remote sensing and geographical information systems for environmental studies*, J. D. Sauerländer Verlag Frankfurt am Main, *Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt*, Band 138, Seiten 148 – 157.
- FRICK, A. (2006): *Beiträge höchstauflösender Satellitenfernerkundung zum FFH-Monitoring-Entwicklung eines wissensbasierten Klassifikationsverfahrens und Anwendung in Brandenburg*. Dissertation, TU Berlin, Institut für Landschaftsarchitektur und Umweltplanung, Fachgebiet für Geoinformationsverarbeitung in der Landschafts- und Umweltplanung.
- FÖRSTER, M. (2006): *Ableitung von Parametern zum Monitoring von FFH-Lebensraumtypen durch höchstauflösende Fernerkundungsdaten*. Dissertation, Ableitung von Parametern zum Monitoring von FFH-Lebensraumtypen durch höchstauflösende Fernerkundungsdaten (in Vorbereitung).
- GAUER, J. und ALDINGER, E. (Herausgeber) (2005): *Waldökologische Naturräume Deutschlands - Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke - mit Karte 1:1.000.000*, *Mitteilungen des Vereins für Forstliche Standortskunde und Forstpflanzenzüchtung*, Band 43. HENKELdruck, Stuttgart.
- GU, D. und GILLESPIE, A. (1998): Topographic Normalization of Landsat TM Images of Forest Based on Subpixel Sun-Canopy-Sensor Geometry. *Remote Sensing of Environment* **64**(2): 166 – 175.
- HABERÄCKER, P., KIRCHHOFF, W., KRAUTH, E., KRITIKOS, G., WINTER, R., SCHRAMM, M. und SOSNOWSKI, H. (1979): *Auswertung von Satellitenaufnahmen zur Gewinnung von Flächennutzungsdaten*. Schriftenreihe „Raumordnung“ des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn, 133 Seiten.

- HILDEBRANDT, G. (1996): *Fernerkundung und Luftbildmessung für Forstwirtschaft, Vegetationskartierung und Landschaftsökologie*. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg, 680 Seiten.
- HOLMGREN, P. und THURESSON, T. (1998): Satellite Remote Sensing for Forestry Planning A review. *Scandinavian Journal Forest Research* (13): 90 – 110.
- IÖST, A., KÖHL, M., KROHNER, F., OEHMICHEN, K., POLLEY, H. und RIEDEL, T. (2006): Schlussbericht zum Projekt „Bundeswaldinventur: Weiterentwicklung des Inventurverfahrens durch Integration von Erdbeobachtungsdaten“. *Technischer Bericht*, Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Institut für Waldökologie und Walderfassung, Eberswalde.
- ITTEN, K., MEYER, P., KELLENBERGER, T., SANDMEIER, S., LEU, R., BITTER, P. und SEIDEL, K. (1992): Correction of the Impact of Topography and Atmosphere on Landsat-TM Forest Mapping of Alpine Regions. *Remote Sensing Series Band 18*: 48 Seiten. Geographisches Institut der Universität Zürich.
- JACOBSEN, K. (2005): Use of very high resolution satellite imagery. In *Tagung der Polnischen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und GIS*, Warschau.
- JOINT RESEARCH CENTER (2003): Technischer Bericht zur Orthorektifizierung der Landsat 7-Daten im Projekt CORINE Land Cover Update 2000. *Technischer Bericht*.
- JUSTICE, C., WHARTON, S. und HOLBEN, B. (1982): Application of digital terrain data to quantify and reduce the topographic effect on Landsat data. *International Journal of Remote Sensing* 2(3): 213 – 230.
- KAHABKA, H. (2001): *Erfassung von neuartigen Waldschäden mit Landsat TM Satellitenbildern auf Basis eines bestehenden Stichprobennetzes - Eine exemplarische Untersuchung an der Baumart Fichte im Schwarzwald*. Dissertation, Universität Freiburg, Forstwissenschaftliche Fakultät. URL: <http://webdoc.sub.gwdg.de/ebook/y/2001/freidok/151.dpf> (Stand: Februar 2004).
- KEIL, M., SCHARDT, M., SCHUREK, A. und WINTER, R. (1990): *Untersuchung und Kartierung von Waldschäden mit Methoden der Fernerkundung . DLR- Abschlußdokumentation*, Kapitel Auswertung von Satellitendaten, Teil B7. Seiten 71 – 131.
- KÖHL, M. (1994): *Statistisches Design für das zweite Schweizerische Landesforstinventar: Ein Folgeinventurkonzept unter Verwendung von Luftbildern und terrestrischen Aufnahmen*, Mitteilungen der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Band 69. Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft Birmensdorf, 141 Seiten.
- KÖHL, M. und LAUTNER, M. (2001): Erfassung von Waldökosystemen durch Hyperspektraldaten. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* 2: 107 – 117.
- KÖHL, M. und PÄIVINEN, R. (1996): *Definition of a System of Nomenclature for Mapping European Forests and for Compiling a Pan-European Forest Information System*. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, 238 Seiten.

- KÖHL, M., STÜMER, W., SCHEUBER, M., ZIESE, H., HÄUSSLER, T. und LAUTNER, M. (2001): Combining hyperspectral data and ground surveys for the assessment of non-wood goods and services of forests. In BUCHROITHNER, F. (Herausgeber), *A decade of trans-european remote sensing cooperation, Proceedings of the 20th EARSeL Symposium*, Balkema Publishers, Seiten 111 – 116.
- KÖHL, M., TRAUB, B. und PÄIVINEN, R. (2000): Harmonisation and Standardisation in Multi-National Environmental Statistics - Mission Impossible? *Environmental Monitoring and Assessment* **63**(2): 361 – 380.
- KLOSE, F. und ORF, S. (1998): *Forstrecht - Kommentar zum Waldrecht des Bundes und der Länder*. Achendorff Rechtsverlag Münster, 2. neubearbeitete und erweiterte Auflage, 746 Seiten.
- KOCH, B., JOCHUM, M., IVITS, E. und DEES, M. (2003): Pixelbasierte Klassifizierung im Vergleich und zur Ergänzung zum objektbasierten Verfahren. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* **3**: 195 – 204.
- KOMAGATA, N. (2002): Chance Agreement and Significance of the Kappa Statistic. URL: <http://www.tcnj.edu/komagata/pub/Kappa.pdf> (Stand: Mai 2004).
- KOUKAL, T. (2004): *Nonparametric Assessment of Forest Attributes by Combination of Field Data of the Austrian Forest Inventory and Remote Sensing Data*. Dissertation, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation.
- LANG, S. und LANGANKE, T. (2006): Objekt-based mapping and objekt-relationship modeling for land use classes and habitats. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* **1**: 5 – 18.
- LEU, R. (1991): *Digitale Kartierung des Schweizer Waldes mit Landsat TM-Daten: Teil 2, Atmosphärische Korrekturen und Klassifikation*. Master-Arbeit, Geographisches Institut der Universität Zürich.
- LILLESAND, T. und KIEFER, R. (2000): *Remote sensing and image interpretation*. John Wiley & Sons, 4. Auflage, 736 Seiten.
- LIN, C. und PAIVINEN, R. (1999): Remote Sensing and Forestry Information Needs in the 21st Century. In ZAWILA-NIEDZWIECKI, T. und BRACH, M. (Herausgeber), *Remote Sensing and Forest Monitoring proceedings*, Warsaw Agricultural University, Faculty of Forestry.
- MARX, A. (2006): *Entscheidungsbaum-Modell für die automatisierte Erfassung von Nadelverlustkategorien in Quickbird-Satellitenbildern am Beispiel eines südbrandenburgischen Gradationsgebietes der Nonne (Lymantria monacha)*. Master-Arbeit, Fachhochschule Eberswalde, Fachbereich Forstwirtschaft.
- MCCORMICK, N. (1999): *Satellite-based forest mapping using the SILVICS Software*. Space Application Institute Joint, Research Centre, Ispra, Italy.

- MEINEL, G. und NEUBERT, M. (2004): A comparison of segmentation programs for high resolution remote sensing data. In *Proceedings XXth ISPRS Congress, Istanbul, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Band XXXV-B4, Seiten 1097–1102. URL: <http://www.isprs.org/istanbul2004/comm4/papers/506.pdf> (Stand: November 2005).
- OEHMICHEN, K. und WILLKOMMEN, J. (2004): EstimateThreshold. Software.
- RICHARDS, J. A. und JIA, X. (1999): *Remote Sensing Digital Image Analysis*. Springer, Berlin/Heidelberg, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, 363 Seiten.
- RIEDEL, T. (2006): *Evaluierung alternativer Inventurdesigns für die Bundeswaldinventur*. Dissertation, Universität Hamburg (in Vorbereitung).
- SAGISCHEWSKI, H., KRÜGER, J., KOCH, B. und CHMARA, S. (2003): *Verfahrensentwicklung zur fernerkundungsbasierten Erstellung des Waldflächenverzeichnisses Thüringens, Abschlussbericht*, Band 22. Thüringer Landesanstalt für Wald, Jagd und Fischerei, 120 Seiten.
- SCHARDT, M. (1990): *Verwendbarkeit von Thematic Mapper - Daten zur Klassifizierung von Baumarten und natürlichen Altersklassen*. Dissertation, DLR, Hauptabteilung Angewandte Datentechnik, Oberpfaffenhofen.
- SONG, C., WOODCOCK, C., SETO, K., LENNEY, M. und MACOMBER, S. (2001): Classification and Change detection using Landsat TM Data: When and how to correct Atmospheric Effects? *Remote Sensing of Environment* **75**: 230 – 244.
- STEINNOCHER, K. (1999): Adaptive Fusion of Multisource Raster Data Applying Filter Techniques. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing* **32**: 108 – 115.
- STÜMER, W. und KÖHL, M. (2005): Kombination von terrestrischen Aufnahmen und Fernerkundungsdaten mit Hilfe der k-Nächste-Nachbarn-Methode zur Klassifizierung und Kartierung von Wäldern. *Photogrammetrie Fernerkundung Geoinformation* **1**: 23 – 36.
- TEILLET, P., GUINDON, B. und GOODENOUGH, D. (1982): On the slope-aspect correction of multispectral scanner data. *Canadian Journal of Remote sensing* **8**(2): 84 – 106.
- TOMPPPO, E. (1993): Multi-source national forest inventory of Finland. In *Proceedings of Ilvesalo symposium on National Forest Inventories*, Finnish Forest Research Institute, *Research papers*, Band 444, Seiten 52 – 59.
- TOMPPPO, E. und PEKKARINEN, A. (1997): Methodenerprobung der Finnischen Nationalen Multiquellen-Waldinventur in Nordrhein-Westfalen. *Landeswaldinventur - Konzeption, Verfahrenstest, Ergebnisse. Schriftenreihe der Landesforstverwaltung Nordrhein-Westfalen* (5): 52 – 67.
- TRÖLTZSCH, K. (2004): *Nutzung der Software eCognition zur Erfassung von Waldstrukturparametern*. Master-Arbeit, TU Dresden, Institut für Kartographie.

- UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE (2001): Definitions, modalities, rules and guidelines relating to land use, land-use change and forestry activities under the Kyoto Protocol. URL: [http://unfccc.int/files/meetings/workshops/other\\_meetings/application/pdf/11cp7.pdf](http://unfccc.int/files/meetings/workshops/other_meetings/application/pdf/11cp7.pdf) (Stand: November 2005).
- VAN GENDEREN, J., LOCK, B. und VASS, P. (1978): Remote Sensing: Statistical Testing of Thematic Map Accuracy. *Remote Sensing of Environment* **7**: 3 – 14.
- WALD, L., RANCHIN, T. und MANGOLINI, M. (1997): Fusion of Satellite Images of Different Spatial Resolutions: Assessing the Quality of Resulting Images. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* **63**(6): 691–699.
- WHITESIDE, T. und AHMAD, W. (2005): A comparison of object-oriented and pixel-based classification methods for mapping land cover in northern australia. In *Proceedings of SSC2005 Spatial intelligence, innovation and praxis: The national biennial Conference of the Spatial Sciences Institute*, Spatial Sciences Institute, Melbourne, Seiten 1255 – 1231.

## Abbildungsverzeichnis

3.1	Systematische Stichprobenverteilung und Stichprobennetz der BWI . . . . .	12
3.2	Datenaufnahme an der Traktecke . . . . .	13
3.3	Sensoraufnahmen für einen identischen Ausschnitt des Pfälzerwaldes von Quick-Bird (pan) (a), QuickBird (ms) (b) und Landsat 7 (ms) (c) . . . . .	14
3.4	Artefakte in der QuickBird-Szene: Überladungseffekte der Detektoren (a) und (b), Flugzeugüberflug (c) . . . . .	15
3.5	Spaltenversatz in den Landsat 7-Szenen des UG Sachsen . . . . .	16
3.6	Qualitätsmängel der Orthofotos: (a) Überbelichtung, (b) starke Grauwertdifferenzen benachbarter Kacheln . . . . .	17
3.7	Lage der Untersuchungsgebiete . . . . .	20
4.1	Verschiedene Einflußfaktoren auf die vom Sensor empfangene Strahlung (nach RICHARDS und JIA (1999)) . . . . .	26
4.2	Zu korrigierender Ausschnitt einer Landsat 7-Szene (a), Ergebnisse der einfachen Kosinuskorrektur: deutliche Überkorrekturen (b) . . . . .	28
4.3	Ausschnitt der Illumination ( $\cos(i)$ ) aus Landsat 7-Daten des UG Sachsen . . . . .	28
4.4	Fusion von Landsat 7-Daten: multispektrale Originaldaten (a), pan-Kanal (b) und AIF-Fusion (c) (Ausschnitt des UG Sachsen: Schloß Moritzburg und Umgebung) . . . . .	31
5.1	Ausschnitt aus Gesamtholzbodenmaske des UG Sachsen kombiniert aus Nadel- (dunkelgrün), Laub- (lila) und Mischwaldgruppe (gelb), Nichtwald (schwarz) . . . . .	37
5.2	Herleitung der geeigneten „Mindestbestockungsfläche“ nach BWI-Walddefinition für Landsat-Daten (1 Pixel = 25 * 25 m) (a) und QuickBird-Daten (1 Pixel = 2,8 * 2,8 m) (b) (grün - reelle bestockte Fläche, gelb - Mischpixelbereich) . . . . .	43
5.3	Beispiel für die Medianfilterung: a) Ausgangssituation: Zentralpixel gehört zur Objektklasse Holzboden (1) b) Ergebnis der Filterung: Zentralpixel wurde der Klasse Nichtwald (0) zugeschlagen . . . . .	43
5.4	Unterschiede zwischen ungefilterter (a) und mediangefilterter (b) LS7-Holzbodenmaske, UG Pfälzerwald (grün - Holzboden, schwarz - Nichtwald) . . . . .	44
5.5	Ausschnitt einer ungefilterter LS5-Holzbodenmaske des UG Westliches Mittelgebirge (a) und nach erfolgter Eliminierung der Kleinstflächen (b) (grün - Holzboden, schwarz - Nichtwald) . . . . .	45
6.1	Differenzen der Klassifizierungsergebnisse basierend auf AIF-Bild und unfusionierten Landsat 7-Daten (UG Sachsen) (a): grau - übereinstimmende Nichtwalderkennung, hellgrün - Wald AIF, rot - Nichtwald AIF, dunkelgrün - übereinstimmende Walderkennung, Orthofotoausschnitt (b) . . . . .	56

---

6.2	Unterschiedliche Walderkennung der Signaturerhebung über 1 Pixel oder 3 x 3 Pixel (Mean - a, Median - c) an zwei verschiedenen Gebieten: Vergleich Differenzbild Waldmaske (a, c) - Orthofoto (b, d), UG Sachsen . . . . .	60
6.3	Unterschiede der Walderkennung, die aus der Signaturerhebung über 1 Pixel oder 3 x 3 Pixel (Median) resultieren, Differenzbild Waldmaske (a) - Orthofoto (b), UG Pfälzerwald . . . . .	61
6.4	Unterschiedliche Klassifizierung der Schattenflächen durch die Holzbodenmasken: Ein-Pixel (a) und 7 x 7-Pixel (Median) (b) im Vergleich zum panchromatischen QuickBird-Kanal (c), UG Pfälzerwald . . . . .	63
6.5	Verteilung der Kontrollpunktraster im Untersuchungsgebiet Sachsen . . . . .	65
6.6	Fehleranalyse: BWI-Traktecke mit Status Nichtwald (a), Waldtraktecke, die außerhalb der Waldmaske liegt (b) . . . . .	68
6.7	Fehlklassifizierungen der Kategorie Nichtwald (roter Referenzpunkt) und Holzboden (gelbe Referenzpunkte), wobei schwarze Flächen Nichtwald und grüne Flächen Holzboden darstellen. Ausschnitt aus Holzbodenmaske (a) und Orthofoto (b) des UG Westliches Mittelgebirge, Landsat 5 . . . . .	72
6.8	Fehleranalyse: BWI-Traktecke mit Status Wald im Orthofoto (a), im QuickBird-Pan-Kanal (b) und in der QuickBird-Waldmaske (c) . . . . .	78
6.9	Sensorenvergleich anhand eines Ausschnittes des UG Pfälzerwald der Landsat 7- (a) und QuickBird-Waldmaske (b) (grün - Wald, schwarz - Nichtwald) sowie des panchromatischen QuickBird-Kanals (c) . . . . .	80
6.10	Einfluss von Lageabweichungen der Satellitenbilder auf Veränderungsrechnung .	83

## Tabellenverzeichnis

2.1	Sensoreigenschaften des MSS und TM (Landsat 5) und ETM <sup>+</sup> (Landsat 7) . . .	5
2.2	QuickBird-Sensoreigenschaften (Nadir) . . . . .	5
2.3	Übersicht zu aktuellen Erdbeobachtungssatelliten . . . . .	9
2.4	Übersicht zukünftiger Erdbeobachtungssatelliten . . . . .	10
3.1	Szeneninformationen der QuickBird-Daten . . . . .	14
3.2	Übersicht zu den verwendeten Landsat-Daten . . . . .	16
3.3	Geographische Informationen zu den Untersuchungsgebieten . . . . .	20
4.1	Parameter für AIF der Landsat 7-Daten . . . . .	30
5.1	Verwendete Software . . . . .	33
5.2	Quantitative Kriterien von Waldflächendefinitionen . . . . .	34
5.3	Schlüsselwerte für die Nichtwald-, Holzboden- und BWI-Wald-Zuordnung der Traktecken . . . . .	35
5.4	Genauigkeiten der kombinierten Gesamtholzbodenmaske (Laub-, Nadel- und Mischwald) UG Sachsen . . . . .	38
5.5	Gegenüberstellung der Genauigkeiten einer Auswahl von Waldmasken, die unter Annahme der 95 %igen Genauigkeit bzw. mittels der schrittweisen Verbesserung für die Untersuchungsgebiete Westliches Mittelgebirge (UG 1), Nordostdeutschland (UG 2), Alpen (UG 4) und Pfälzerwald (UG 5) erzielt wurden . . . . .	40
5.6	Verfahrensablauf zur Waldmaskenerstellung . . . . .	46
5.7	Beispiel einer Fehlermatrix mit Hersteller- und Nutzergenauigkeit . . . . .	47
5.8	Minimaler Stichprobenumfang pro Klasse (nach VAN GENDEREN ET AL. (1978))	50
6.1	Parameter der linearen Regression zwischen den spektralen Werten L und dem lokalen Sonneneinfallswinkel $\cos(i)$ für die Landsat 7-Daten (Subset aus UG Sachsen) ( $L = b + m * \cos(i)$ ) . . . . .	53
6.2	Vergleich zwischen Original- und Fusionsbild anhand statistischer Kenngrößen (östliche Szene des UG Nordostdeutschland, Landsat 7, AIF-Parameter: 7 Iterationen, Filtergröße 13 * 13) . . . . .	55
6.3	Genauigkeitsvergleich zwischen fusionierter (links) und unfusionierter Holzbodenmaske (östliche Szene des UG Nordostdeutschland, Landsat 7) . . . . .	55
6.4	Untersuchung zum Bias von Referenzdaten für UG Sachsen . . . . .	57
6.5	Verifizierungsergebnisse der Ein-Pixel-, Mean- und Median-Holzbodenmasken (UG Sachsen, Landsat 7) . . . . .	58
6.6	Verifizierungsergebnisse der Ein-Pixel- und Median-Waldmasken (UG Sachsen, Landsat 7) . . . . .	59

6.7	Verifizierungsergebnisse der Ein-Pixel-, Mean- und Median-Holzbodenmasken (UG Pfälzerwald, Landsat 7) . . . . .	59
6.8	Verifizierungsergebnisse der Ein-Pixel- und Median-Waldmasken (UG Pfälzerwald, Landsat 7) . . . . .	59
6.9	Waldflächenerkennung durch Median- bzw. Ein-Pixel-Signaturerhebung im Vergleich zur BWI (UG Sachsen, Landsat 7) . . . . .	61
6.10	Vergleich der Genauigkeiten von Mean- und Median-QuickBird-Holzbodenmasken mit PanQB-Referenzdaten (327 Referenzpunkte für Wald und 261 für Nichtwald, siehe Kapitel 5.3) . . . . .	62
6.11	Verifizierung verschiedener QuickBird-Holzbodenmasken mit PanQB-Referenzdaten . . . . .	62
6.12	Ergebnisse der Verifizierung verschiedener QuickBird-Waldmasken mit BWI-Traktecken . . . . .	64
6.13	Zuordnungsmatrix der Kontrollpunkte für Orthofoto und Holzbodenmaske für das UG Sachsen (Landsat 7) . . . . .	65
6.14	Fehleranalyse zum Vergleich Orthofoto - Holzbodenmaske für das UG Sachsen (Landsat 7) anhand der 822 Kontrollpunkte . . . . .	66
6.15	Genauigkeiten der „sicheren“ Holzbodenmaske UG Sachsen . . . . .	67
6.16	Genauigkeiten der „unsicheren“ Holzbodenmaske UG Sachsen . . . . .	67
6.17	Gesamtgenauigkeiten der Holzbodenmaske UG Sachsen . . . . .	67
6.18	Genauigkeiten der adaptierten Waldmaske des UG Sachsen . . . . .	68
6.19	Fehleranalyse der adaptierten Waldmaske des UG Sachsen (basierend auf 2453 BWI-Referenzpunkten) . . . . .	68
6.20	Konfusionsmatrix des Vegetationslayers der TK und der adaptierten Waldmaske des UG Sachsen . . . . .	69
6.21	Flächenbilanz für das UG Sachsen . . . . .	70
6.22	Übersicht der Verifizierungsverfahren für die Holzbodenmaske des UG Sachsen	71
6.23	Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Westliches Mittelgebirge (Landsat 7) .	72
6.24	Genauigkeiten der Waldmaske UG Westliches Mittelgebirge (Landsat 7) . . . .	72
6.25	Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Westliches Mittelgebirge (Landsat 5) .	73
6.26	Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Nordostdeutschland (Landsat 7) . . . .	73
6.27	Genauigkeiten der Waldmaske UG Nordostdeutschland (Landsat 7) . . . . .	73
6.28	Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Alpen (Landsat 7) . . . . .	74
6.29	Genauigkeiten der Waldmaske UG Alpen (Landsat 7) . . . . .	74
6.30	Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Alpen (Landsat 5) . . . . .	75
6.31	Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Pfälzerwald (Landsat 7) . . . . .	75
6.32	Genauigkeiten der Waldmaske UG Pfälzerwald (Landsat 7) . . . . .	76
6.33	Genauigkeiten der Holzbodenmaske UG Pfälzerwald (Landsat 5) . . . . .	76
6.34	Genauigkeiten einer QuickBird-Holzbodenmaske basierend auf BWI-Signaturen	76
6.35	Genauigkeiten der QuickBird-Holzbodenmaske, mit PanQB-Referenzdaten (oben) und BWI-Traktecken (unten) analysiert . . . . .	77
6.36	Genauigkeiten der QuickBird-Waldmaske, mit PanQB-Referenzdaten (oben), BWI-Traktecken (Mitte) und Aufnahmen des Biosphärenreservates (BR) und BWI-Traktecken (unten) analysiert . . . . .	77

6.37 Fehleranalyse der adaptierten QuickBird-Waldmaske mit Aufnahmen des Biosphärenreservates und BWI-Traktecken als Referenzdaten (insgesamt 1006 Referenzpunkte) . . . . .	78
6.38 Genauigkeiten für die Landsat 7- und QuickBird-Waldmasken, UG Pfälzerwald	79
6.39 Waldfläche der Landsat 7- und QuickBird-Waldmaske, UG Pfälzerwald . . . . .	79
6.40 Vergleich der Waldflächen der BWI, der fernerkundungsbasierten Waldmasken (Landsat 7) und des Vegetationslayers der Topographischen Karte (TK) . . . . .	81
6.41 Übersicht zu Gesamtgenauigkeiten, Kappa-Koeffizienten und Vertrauensintervallen nach FREUND (1992) mit Konfidenzniveau von 95 % für Landsat 7- und QuickBird-Waldmasken . . . . .	81
6.42 Übersicht zu den Gesamtgenauigkeiten und Kappa-Koeffizienten der Landsat 5- und Landsat 7-Holzbodenmasken . . . . .	82
6.43 Veränderungsrechnung für die Untersuchungsgebiete Westliches Mittelgebirge (UG1), Alpen (UG4) und Pfälzerwald (UG5) . . . . .	83
7.1 Arbeitsaufwand und Kosten für eine an die BWI-Walddefinition angepasste Waldmaskenerstellung basierend auf einer Landsat-Szene (31.450 km <sup>2</sup> ) . . . . .	86
7.2 Arbeitsaufwand und Kosten für eine an die BWI-Walddefinition angepasste Waldmaskenerstellung basierend auf QuickBird-Daten (581 km <sup>2</sup> ) . . . . .	87
7.3 Kosten für die Orthokorrektur für Landsat- und QuickBird-Daten der Firma Euromap (Stand: März 2005) . . . . .	87
7.4 Kosten für die Verfahren der Waldmaskenerstellung für das gesamte Bundesgebiet im Vergleich zu den BWI-Gesamtkosten . . . . .	87