

**Henning Buddenbaum**

Vom Fachbereich VI  
(Geographie/Geowissenschaften)  
der Universität Trier  
zur Verleihung des akademischen Grades  
Doktor der Naturwissenschaften  
(Dr. rer. nat.)  
genehmigte Dissertation

# Charakterisierung von Forstbeständen mit Hilfe von Laserscanning und Reflexionsmodellierung

Betreuer:  
Univ.-Prof. Dr. Joachim Hill

Berichterstatter:  
Univ.-Prof. Dr. Joachim Hill  
apl. Prof. Dr. Willy Werner

Datum der wissenschaftlichen Aussprache:  
20. Januar 2010

Trier, 2010



# Inhaltsverzeichnis

<b>Kapitel 1</b>	<b>Einleitung</b> .....	<b>1</b>
<b>Kapitel 2</b>	<b>Material</b> .....	<b>5</b>
2.1	Das Untersuchungsgebiet .....	5
2.2	Verwendete Daten.....	6
2.2.1	Laserscannerdaten.....	6
2.2.2	Hyperspektrale Fernerkundungsdaten .....	6
2.2.3	Forstinformationssysteme.....	9
2.2.4	Geländemessungen .....	9
<b>Kapitel 3</b>	<b>Airborne Laserscanning</b> .....	<b>15</b>
3.1	Entwicklung und Anwendungen von Laserscanning .....	19
3.2	Physikalische Grundlagen.....	21
3.2.1	Das Messprinzip .....	22
3.2.2	Der „Fußabdruck“ des Laserstrahls .....	22
3.2.3	Die Energie des Laserstrahls.....	23
3.3	Der verwendete Datensatz .....	25
3.4	Vorverarbeitung der Lidar-Daten.....	27
3.4.1	Filtern der Bodenpunkte .....	28
3.4.2	Kacheln der Punktdatensätze.....	29
3.4.3	Interpolation der Punktdaten.....	30
3.4.4	Zusammenfügen der Kacheln .....	32
3.4.5	Berechnung des Kronenmodells.....	32
3.4.6	Datenprodukte.....	32
3.4.7	Qualitätskontrolle der Lidar-Daten.....	36
3.5	Full-Waveform-Lidar .....	37
3.5.1	Datenformat der Full-Waveform-Lidar-Daten .....	39
3.5.2	Visualisierungen der Full-Waveform-Lidar-Daten .....	41
3.5.3	Rastern der Full-Waveform-Lidar-Daten.....	44
3.5.4	Ableitung zusätzlicher Punktdaten aus Full-Waveform-Daten .....	51
<b>Kapitel 4</b>	<b>Ableitung struktureller Forstparameter aus Laserscanning</b> .....	<b>56</b>
4.1	Baumhöenschätzung .....	56
4.1.1	Baumhöenmessung im Gelände .....	56
4.1.2	Baumhöenschätzung durch Photogrammetrie.....	57
4.1.3	Baumhöenschätzung aus Daten optischer Satelliten .....	57
4.1.4	Baumhöenschätzung per Radar .....	58
4.1.5	Baumhöenschätzung mit Laserscanning.....	59
4.2	Schätzung der Kronenlänge und der Kronenuntergrenze .....	63

4.3	Schätzung der Stammzahl.....	66
4.4	Identifikation einzelner Bäume .....	69
4.5	Schätzung des Bestandslückenanteils .....	73
4.6	Schätzung des Blattflächenindex .....	78
4.7	Schätzung der Biomasse .....	81
4.8	Schätzung des Holzvorrats .....	83
4.9	Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen.....	84
4.10	Integration von Laserscanner- und Hyperspektraldaten .....	86
<b>Kapitel 5</b>	<b>Reflexionsmodellierung .....</b>	<b>90</b>
5.1	Modellierung der Blatt- und Nadelreflexion .....	91
5.1.1	PROSPECT .....	93
5.1.2	LIBERTY .....	96
5.2	Das Bestandsreflexionsmodell FRT .....	98
5.2.1	Modellierung der Bodenreflexion in FRT .....	100
5.2.2	Bedienung des Modells FRT .....	100
5.2.3	Sensitivitätsanalyse .....	102
5.3	Das Bestandsreflexionsmodell FLIM/INFORM .....	104
5.3.1	Modellbeschreibung .....	106
5.3.2	Bedienung des Modells.....	107
5.3.3	Sensitivitätsanalyse .....	108
5.3.4	Vorwärtsmodellierung der Idarwald-Bestände.....	113
5.4	Invertierung von Reflexionsmodellen .....	114
5.5	Invertierung von FRT.....	115
5.5.1	Inversion ohne Zusatzinformationen .....	116
5.5.2	Inversion mit Informationen aus Lidar .....	118
5.6	Invertierung von FLIM/INFORM .....	121
5.6.1	Invertierung von FLIM/INFORM über Lookup-Tables .....	121
5.6.2	Invertierung von FLIM/INFORM über numerische Minimierung.....	126
5.7	Fazit.....	127
<b>Kapitel 6</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>128</b>
6.1	Laserscanning zur Forstfernerkundung .....	128
6.2	Reflexionsmodellierung.....	132
6.3	Kosten-Nutzen-Analyse .....	133
6.4	Ausblick .....	134
<b>Literatur</b>	<b>.....</b>	<b>135</b>
<b>Anhang A</b>	<b>Geländemessungen.....</b>	<b>155</b>
<b>Anhang B</b>	<b>Radiometrische Korrektur der HyMap-Daten.....</b>	<b>156</b>
B.1	Optische Dicke der Atmosphäre.....	156
B.2	Atmosphärenkorrektur.....	157
B.3	Durchführung der Atmosphärenkorrektur .....	158

<b>Anhang C</b>	<b>Programmcodes.....</b>	<b>160</b>
C.1	Programm zum Rastern der Lidar-Punktdateien .....	160
C.2	Funktion zum Einlesen der Fullwave-Daten.....	161
C.3	Programm zum Rastern der Fullwave-Daten.....	162
C.4	Programm zur Extraktion von Punkten aus Fullwave-Daten .....	163
<b>Anhang D</b>	<b>Karten.....</b>	<b>165</b>
D.1	Baumhöhen .....	165
D.2	Kronenlängen und -untergrenzen .....	166
D.3	Fractional Cover RR und FR.....	167
D.4	Fractional Cover IR und BL.....	168
D.5	Fractional Cover nach Lefsky-Modell.....	169
<b>Anhang E</b>	<b>Konfusionsmatrizen.....</b>	<b>170</b>
E.1	Eingangsdaten: HyMap .....	170
E.2	Eingangsdaten: HyMap und Lidar-Perzentile.....	170
E.3	Eingangsdaten: HyMap und Lidar-Wellenformen .....	170
E.4	Eingangsdaten: Lidar-Wellenformen .....	171
<b>Anhang F</b>	<b>In- und Output des Modells FRT .....</b>	<b>172</b>
F.1	Die Inputdatei .....	172
F.2	Output des Bestandsreflexionsmodells FRT .....	176

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Die Untersuchungsgebiete in Rheinland-Pfalz.....	5
Abbildung 2: Atmosphärenkorrektur des HyMap-Bildes .....	7
Abbildung 3: Graphische Benutzeroberfläche zur Analyse sphärischer Fotos.....	11
Abbildung 4: Gewichte der Gaussfrac .....	12
Abbildung 5: Höhenkurven nach Geländemessungen für Buchen, Fichten und alle Bäume.....	13
Abbildung 6: Die Verortung der Laserpunkte erfolgt durch Aufzeichnung der Scanrichtung, ein inertiales Navigationssystem und differentielles GPS .....	15
Abbildung 7: Aus der Subtraktion von Oberflächenmodell und Höhenmodell ergibt sich das normalisierte Kronenmodell.....	17
Abbildung 8: Durch Kombination der First und Only Pulse wird das Oberflächenmodell erzeugt.....	18
Abbildung 9: Verteilung der First/Only-Laserpunkte auf einem Teilgebiet.....	26
Abbildung 10: Histogramme der gerasterten Laserscanner-Datensätze.....	27
Abbildung 11: Format der Ascii-Dateien. ....	27
Abbildung 12: Laser-Einzelpunkte, Schnitt .....	29
Abbildung 13: Bounding Boxes a) der Flugstreifen, b) der gelieferten Punktdaten, c) der gekachelten Punktdaten .....	30
Abbildung 14: Links: Delaunay-Triangulation. Rechts: Lineare Interpolation der Dreiecksflächen. ....	31
Abbildung 15: Karte der Laserscanning-Datensätze Idarwald 2005. First/Only-Datensatz (DOM) und Ground-Datensatz (DHM) .....	34
Abbildung 16: Karte der Laserscanning-Datensätze Idarwald 2005 Teil 2. Normalisiertes Kronenmodell (nKM) und Intensität der First/Only-Punkte. ....	35
Abbildung 17: Virtuelle Entwaldung .....	36
Abbildung 18: Aufzeichnung von Full-Waveform-Daten.....	38
Abbildung 19: Variablen der Full-Waveform-LiDAR-Daten. ....	40
Abbildung 20: Start- und Echowellenform des ersten Laserpulses.....	41
Abbildung 21: Bündel von Wellenformen auf einem Bodenabschnitt von 4 m × 4 m. ....	42
Abbildung 22: Alle Wellen eines Scanstreifens mit farbcodierten Intensitäten.....	42
Abbildung 23: Entzerrte hemisphärische Fotos und gemittelte Wellenformen.....	43

Abbildung 24: Voxels über dem Boden. ....	44
Abbildung 25: Links: Intensität in einem nicht kalibrierten Streifen. Rechts: Gemittelte Intensität quer zur Flugrichtung. ....	46
Abbildung 26: Häufigkeiten von Laserpulsen in einem Ausschnitt des Untersuchungsgebiets .....	47
Abbildung 27: Vertikalschnitt durch eine Zeile Full-Waveform-Daten. ....	48
Abbildung 28: Horizontale, bodenparallele Schnitte durch gerasterte Wellenformdaten. ....	49
Abbildung 29: Perzentilhöhen.....	49
Abbildung 30: Kombinierte Hyperspektral- und Fullwave-Lidar-Daten.....	50
Abbildung 31: Links: Vereinfachte Darstellung des Algorithmus zur Dekomposition. Rechts: Schrittweise Dekomposition einer Wellenform in drei Gaußkurven .....	55
Abbildung 32: Häufigkeitsverteilung von First/Only-Laserpunkten.....	61
Abbildung 33: Baumhöhenschätzung von Buchen und Fichten aus Einzelpunktdaten.....	61
Abbildung 34: Effekt der Filterung des Höhendatensatzes.....	63
Abbildung 35: Links: Aus Rasterdaten geschätzte und im Gelände gemessene Baumhöhen von Fichten und Buchen. Rechts: 2-Zonen-Filter .....	63
Abbildung 36: Aus Lidar-Daten bestimmte Kronenuntergrenzen.....	64
Abbildung 37: Kronenuntergrenzen im Perzentil-basierten Verfahren.....	65
Abbildung 38: Im Gelände und mit Lidar gemessene Kronenuntergrenzen und -längen.....	65
Abbildung 39: Histogramme der Kronenlängen und der Kronenuntergrenzen .....	66
Abbildung 40: Baumspitzen (grüne Kreuze) in vier unterschiedlichen Beständen. ....	69
Abbildung 41: Laserpunkte zweier einzelner Bäume im Wald. ....	71
Abbildung 42: Karte der zu einzelnen Kronen gehörenden Laserpunkte.....	71
Abbildung 43: Digitales Oberflächenmodell eines Bildausschnitts und mit Watershed-Algorithmus segmentierte Kronen.....	72
Abbildung 44: Ausschnitt der vier Fractional-Cover-Modelle in Falschfarbdarstellung.....	75
Abbildung 45: Fractional-Cover-Modelle nach LEFSKY et al.....	76
Abbildung 46: Schätzung des LAI aus Lidar-Daten mit zwei unterschiedlichen Methoden.....	79
Abbildung 47: Schätzung des LAI aus Lidar-Daten nach dem Ansatz von VERGER et al. ....	81
Abbildung 48: Links: Aus Geländedaten und aus Lidar-Daten geschätztes Holzvolumen, rechts: Histogramm der aus Lidar-Daten geschätzten Holzvolumina.....	84
Abbildung 49: Links: Intensität aller First/Only-Punkte. Mitte: Intensität der First/Only-Punkte ab 2 m über Grund. Rechts: Klassifikation in Laubwald und Nadelwald.....	86

Abbildung 50: Mittlere Signaturen der 6 Klassen. Kanäle 1 bis 122 enthalten HyMap-Reflexionswerte, Kanäle 123 bis 196 Laser-Intensitäten in Höhenschritten von 0.5 m.....	89
Abbildung 51: a) Reflexion und Transmission eines Blattes, gemessen bei diffuser Einstrahlung mit einer integrierenden Sphäre, b) Absorptionskoeffizienten für Chlorophyll und Carotenoide, c) Absorptionskoeffizienten für Wasser und Trockenmasse.....	92
Abbildung 52: Unterschiedliche Modelltypen für die optischen Eigenschaften von Blättern..	93
Abbildung 53: Mit PROSPECT-4 modellierte Blattreflexion..	95
Abbildung 54: Sensitivitätsanalyse LIBERTY; zur Bedeutung der Variablen siehe Tabelle 8..	97
Abbildung 55: Mit FRT simuliertes multiangulares Reflexionsspektrum.....	98
Abbildung 56: Blickwinkel, Sonnenhöhe und relativer Azimut. ....	99
Abbildung 57: Links: Die vier Price-Vektoren. Rechts: Bodenspektrum aus Price-Vektoren	100
Abbildung 58: Parameterdateien des Modells FRT .....	101
Abbildung 59: Sensitivitätsanalyse des Reflexionsmodells FRT, Teil 1. ....	102
Abbildung 60: Sensitivitätsanalyse des Reflexionsmodells FRT, Teil 2. ....	103
Abbildung 61: Mit FLIM/INFORM erzeugtes multiangulares Bestandsreflexionsspektrum.	104
Abbildung 62: Ausgabespektren von INFORM.....	108
Abbildung 63: Variation der PROSPECT-Parameter im kombinierten PROSPECT-4/FLIM/INFORM-Modell.....	110
Abbildung 64: Variation der externen Parameter .....	110
Abbildung 65: Variation der internen Bestandsparameter .....	111
Abbildung 66: Variation des Hotspot-Parameters und des relativen Azimuts. ....	112
Abbildung 67: Verteilung des Reflexionsgrads für Blickwinkel von $-70^\circ$ bis $+70^\circ$ und relative Azimutwinkel von $0^\circ$ bis $180^\circ$ , modelliert mit INFORM.....	112
Abbildung 68: Bild- und Modellspektren der im Idarwald beprobten Buchenbestände .....	113
Abbildung 69: Bildspektren und aus invertierten Parametern erzeugte Modellspektren. ....	117
Abbildung 70: Links absolute Abweichungen zwischen Bildspektren und über Modellinversion rekonstruierten Spektren, rechts prozentuale Abweichungen. ....	118
Abbildung 71: Bild- und Modellspektren der Inversion von FRT unter Zuhilfenahme der Lidardaten.....	119
Abbildung 72: Links absolute Abweichungen zwischen Bildspektren und über Modellinversion unter Zuhilfenahme der Lidardaten rekonstruierten Spektren, rechts prozentuale Abweichungen.....	120
Abbildung 73: Spektren einer mit PROSPECT/FLIM/INFORM erzeugten LUT mit 27 216 Einträgen.....	123



Abbildung 74: HyMap-Bildspektren und mit LIBERTY/INFORM modellierte Spektren sowie Residuen für die 15 im Gelände vermessenen Fichtenbestände. ....	125
Abbildung 75: HyMap-Bildspektren und mit PROSPECT/INFORM modellierte Spektren sowie Residuen für die 13 im Gelände vermessenen Buchenbestände. ....	125
Abbildung 76: Abweichungen zwischen Bildspektren und mit Parametern aus der numerischen Inversion in INFORM modellierten Spektren. Links: absolute Abweichungen, Rechts: Prozentuale Abweichungen. ....	127

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Interkorrelationen der Geländemessungen .....	13
Tabelle 2: Technische Daten des verwendeten Laserscanners .....	25
Tabelle 3: Standardabweichungen der Lidar-Daten auf Sportplätzen .....	37
Tabelle 4: Datenformat der Full-Waveform-LiDAR-Daten .....	39
Tabelle 5: Schätzungen der Stammzahl mit unterschiedlichen Fenstergrößen.....	69
Tabelle 6: Genauigkeitsabschätzung ( $R^2$ ) der vier Fractional-Cover-Modelle mit Hilfe verschiedener Geländemessungen. Zellen mit $R^2 \geq 0.75$ sind grau hinterlegt.....	77
Tabelle 7: Eingangsparameter von PROSPECT-4 .....	94
Tabelle 8: Eingangsparameter von LIBERTY .....	96
Tabelle 9: Eingangsparameter für die Sensitivitätsanalyse von PROSPECT/FLIM/INFORM und für die Spektren in Abbildung 62 .....	108
Tabelle 10: Spannweite der Parameter für die Inversion von FRT .....	116
Tabelle 11: Durch Inversion des Modells FRT bestimmte Parameter für 12 Buchenbestände .....	118
Tabelle 12: Durch Lidar-unterstützte Inversion des Modells FRT bestimmte Parameter für 12 Buchenbestände .....	121
Tabelle 13: Spannweite der Eingangsparameter für die LUT-basierte Inversion von FLIM/INFORM.....	123

## Abkürzungsverzeichnis

5S	Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
6S	Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum
Ascii	American Standard Code for Information Interchange
AtCPro	Atmospheric Correction Program
AVHRR	Advanced very high resolution radiometer
BAI	Branch Area Index
BRDF	Bidirectional reflectance distribution function
Cab	Concentration of Chlorophyll a and b
CHRIS	Compact High Resolution Imaging Spectrometer
Cw	Concentration of water
Cm	Concentration of dry mass
dGPS	differential Global Navigation System
DHM	Digitales Höhenmodell
DOM	Digitales Oberflächenmodell
FC	Fractional Cover
FLIM	Forest Light Interaction Model
FoGIS	Forstliches Geographisches Informationssystem
FOV	Field of View
FRT	Forest Reflectance and Transmittance
GLAS	Geoscience Laser Altimeter System
GPS	Global Navigation System
HyMap	Hyperspectral Mapper
ICESat	Ice, Cloud and land Elevation Satellite
IFOV	Instantaneous Field of View
IMU	Inertial Measurement Unit
INFORM	Invertible Forest Reflectance Model
INS	Inertial Navigation System
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
LAI	Leaf Area Index
LAI <sub>U</sub>	Leaf Area Index (Unterwuchs)
Laser	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LIBERTY	Leaf Incorporating Biochemistry Exhibiting Reflectance and Transmittance Yields

Lidar	Light Detection and Ranging
LUT	Look-up table
LVIS	Laser Vegetation Imaging Sensor
MCRM	Markov Chain Reflectance Model
MISR	Multiangle Imaging SpectroRadiometer
MSRM	Multispectral Canopy Reflectance Model
N	Strukturparameter im Modell Prospect
nKM	normalisiertes Kronenmodell
NN	Normalnull
POLDER	POlarization and Directionality of the Earth's Reflectances
POS	Positionierungs- und Orientierungssystem
r	Korrelation
$r^2$	Bestimmtheitsmaß
Radar	Radio Detection and Ranging
SAIL	Scattering from Arbitrarily Inclined Leaves
SLICER	Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery
SD	Stem density
StAbw	Standardabweichung
Voxel	Volume Element
WÖFIS	Waldökologische Forstinformationssystem

# Kapitel 1 Einleitung

Die Beobachtung und Bewertung von Wäldern ist eins der zentralen Themen der Fernerkundung. Wälder sind auf der Erde die größten Speicher von Biomasse und damit, neben den Ozeanen, die größte Senke für Kohlendioxid (NÆSSET & GOBAKKEN 2008, IPCC 2000). Sie belegen große Flächen und haben neben ihrer wirtschaftlichen Bedeutung multiple Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktionen (Non-wood goods and services, KÖHL & LAUTNER 2001). In Rheinland-Pfalz sind 42% der Landesfläche von Wäldern bedeckt, deutschlandweit ca. 30% (UMWELTBUNDESAMT 2007). Eine genaue Kenntnis über Zusammensetzung, Zustand und Entwicklung der Wälder ist wegen ihrer wichtigen Funktionen und ihres großen Anteils an der Landesfläche von großem wissenschaftlichem und gesellschaftlichem Wert. Flächendeckende detaillierte Beobachtungen sind nur mit fernerkundlichen Mitteln möglich. Klassische Fragestellungen der Waldfernerkundung sind Klassifikationen zur Abgrenzung unterschiedlicher Waldtypen, die Erfassung von Inventurgrößen, die Bestimmung ökophysiologischer Größen und die Detektion zeitlicher Veränderungen von Forstökosystemen (HILL 2009).

Waldfernerkundung muss entsprechend der Waldfunktionen immer mehrere Betrachtungsweisen des Waldes im Auge behalten: Das operative Forstmanagement sieht vor allem den wirtschaftlichen Wert des Holzes (VAN LAAR & AKÇA 2007), während andere Interessengruppen den Wald als Ökosystem, als Erholungsraum, als Jagdrevier, als Reservoir der Biodiversität, als Wasserrückhalt, als Erosionsschutz, als Regulator des lokalen Mikroklimas oder als Kohlendioxidsenke sehen (SCHÜLER 2007, DUNCANSON et al. 2010). Das Hauptaugenmerk des Forstmanagements liegt auf der Produktion des nachwachsenden Rohstoffs Holz, so dass von der Fernerkundung vor allem Informationen über den Holzvorrat, die Artenzusammensetzung, die Altersklassen und die Standortbedingungen erwartet werden. Eine Schnittstelle zur Betrachtung des Waldes als Ökosystems sind die Herausforderungen des globalen und lokalen Klimawandels. Je nach Standortbedingungen müssen neue Baumarten angepflanzt werden, neue Tier- und Pflanzenarten wandern ein, neue Managementstrategien werden notwendig, und Wasserstress, Insektenkalamitäten und Sturmschäden können vermehrt auftreten (NÆSSET 2009b). Zur Beschreibung der ökologischen Wuchsbedingungen und zur Abschätzung der Produktivität und der Kohlenstoff-, Stickstoff- und Wasserbilanz sind von der Fernerkundung Größen wie Blattflächenindex, Biomasse, Pigment- und Wasserkonzentration, Nettoprimärproduktion und Anteil der absorbierten Strahlung gefragt. Zum Wald als Erholungsraum und Träger gesellschaftlicher Werte kann die Fernerkundung beispielsweise Beiträge zur Kartierung von Zugangswegen und von Baumdenkmälern leisten.

Wälder und Forsten sind seit langem ein Objekt besonderen Interesses der Fernerkundung. Die fernerkundliche Beobachtung von Wäldern mit Luftbildern hat eine lange Tradition (DONOGHUE & WATT 2006), der Einsatz von luftgestützten Multi- und Hyperspektralscannern und von Satelliten ist allerdings – zumindest in Deutschland – noch größtenteils auf experimentelle Studien beschränkt (STOFFELS et al. 2007). In Ländern mit sehr großen Waldflächen wie Finnland (TOMPPU 2000), Schweden (NILSSON 2002) oder den USA (MCROBERTS et al. 2002)

gibt es nationale Forstinventuren unter Einsatz von Satellitendaten. Zahlreiche Veröffentlichungen, von denen hier nur ein kleiner Teil genannt werden kann, beschäftigen sich mit der Klassifikation von Waldtypen oder mit der quantitativen Bestimmung ökophysiologischer oder forstwirtschaftlicher Parameter. Auch andere Datenformen wie Radar und später Laserscanning, das Hauptthema der vorliegenden Arbeit, wurden für die Waldfernerkundung eingesetzt. So nutzte beispielsweise WALSH (1980) Landsat-TM-Daten, um zwölf Landbedeckungsklassen, darunter sieben Nadelwaldklassen, zu kartieren. FRANKLIN (1994) stellte einen Vergleich zwischen Compact Airborne Spectrographic Imager (CASI)-, Spot- und Landsat-TM-Daten hinsichtlich ihrer Eignung zur Unterscheidung von Baumarten und -dichten in einem Untersuchungsgebiet in Alberta, Kanada, an. VOHLAND et al. (2007) verbanden multispektrale Klassifikation mit linearer Mischungsanalyse. GHIYAMAT & SHAFRI (2010) geben einen Überblick über die Nutzung abbildender Spektroskopie zur Beurteilung der Biodiversität in Wäldern. RADELOFF et al. (1997) erstellten eine Klassifikation mit multitemporalen Landsat-Daten. Bei der Ableitung quantitativer Parameter aus Fernerkundungsdaten ist beispielsweise die Ableitung des Blattflächenindex (RUNNING et al. 1986, CHEN & CIHLAR 1999, LEE et al. 2004), die Schätzung des Gehalts von Blatthaltsstoffen (CURRAN 1989, GAO & GOETZ 1995, SCHLERF et al. 2010) oder die Messung der Stammzahl pro Hektar (ATZBERGER & SCHLERF 2002, GREENBERG et al. 2005, STOFFELS et al. 2007) zu nennen. Die Nutzung von Reflexionsmodellen in der Forstfernerkundung und die Betrachtung der directionellen Reflexionseigenschaften von Vegetationsbeständen geht vor allem auf SUITS (1972) zurück. Weitere Forst-Reflexionsmodelle wurden unter anderem von CHEN & LEBLANC (1997), ATZBERGER (2000a, b) und KUUSK & NILSON (2000, 2005) vorgestellt.

Einen immer größeren Stellenwert bei der Forstfernerkundung erhält Laserscanning. Die Technik der flugzeug- oder hubschraubergestützten Fernerkundung mittels Laserscanner hat sich in den letzten Jahren rasant entwickelt und gilt inzwischen in den Bereichen Photogrammetrie, Geländeerfassung und Forstinventur als etabliert (WAGNER et al. 2003).

Sowohl Fernerkundung per Luftbildkamera oder Satellitenscanner als auch Laserscanning nutzen elektromagnetische Strahlung als Energie- und damit Informationsübertragungsmedium, aber anders als bei den passiven Verfahren, die reflektierte Sonnenstrahlung aufzeichnen, haben Laserscanner ihre eigene Energiequelle an Bord. Sie können damit, ebenso wie Radarsensoren, unabhängig von der Beleuchtungssituation Aufnahmen machen. Passive Sensoren zeigen oft Schwächen beim Beobachten der interessantesten Ökosysteme, nämlich der Ökosysteme mit besonders hoher Biomasse und hohem Blattflächenindex, denn sie können nur die Oberfläche von Pflanzenbeständen sehen (JENSEN et al. 2008). Laserscanner dagegen erfassen die dreidimensionale Struktur und geben damit Einblicke in den Aufbau von Pflanzenbeständen, die vorher nicht möglich waren (LEFSKY et al. 2002). Aus Laserscanning-Befliegungen im Forst gewonnene Daten können unter anderem für Ernte- und Vorratsschätzungen, Wachstumsmodellierungen, Charakterisierung von Ökosystemen, Eichung anderer Fernerkundungsverfahren oder für Erosionsabschätzungen verwendet werden (KIM et al. 2003). Auch für die Erfassung topographischer Merkmale und von Höhenmodellen ist Laserscanning inzwischen die führende Technologie (LLOYD & ATKINSON 2006, REITBERGER et al. 2008).

Schwerpunkt der vorliegenden Arbeit ist eine Untersuchung der Möglichkeiten, strukturelle Forstparameter aus Laserscanningdaten abzuleiten. Vor diesen Auswertungen der Laserscanningdaten wird die Vorverarbeitung beschrieben. Da Laserscanning eine recht neue Fernerkundungstechnik ist, mussten einige Verfahren zur Vorverarbeitung erst entwickelt werden. Aus den in unregelmäßig verteilten Punkten vorliegenden Daten wurden mehrere Bilder in regelmäßigen Pixelrastern erzeugt: Digitales Geländemodell, digitales Oberflächenmodell, normalisiertes Kronenmodell, Intensitätsbilder der Oberfläche und des Bodens und künstlich beleuchtete Hillshade-Bilder, die einen dreidimensionalen Eindruck der Oberflächen vermitteln. Dazu wurden publizierte und eigene Algorithmen auf die vorliegenden Daten aus dem Untersuchungsgebiet Idarwald angewendet. Abgeleitet aus Laserscanningdaten wurden die Baumhöhe, die Kronenlänge, die Höhe der Kronenuntergrenze, die Stammzahl pro Hektar, der Überschirmungsgrad, der Blattflächenindex, die Biomasse und der Holzvorrat. Außerdem wurden einzelne Kronen abgegrenzt und eine Klassifikation zwischen Laub- und Nadelbäumen anhand der aufgezeichneten Intensitäten der zurückgestreuten Laserscannerdaten durchgeführt.

Der verwendete Laserscanner zeichnet das empfangene Signal nicht nur als einzelne Punkte, sondern als zeitlich aufgelöste Wellenform auf. In diesen Wellenformen steckt ein weiterer Datenschatz, der ausgeschöpft werden kann. Beispielsweise können zusätzliche Punkte abgeleitet werden, die ein genaueres Bild der Kronenformen ermöglichen. Aus den Wellenformdaten wurde ein Datensatz erzeugt, der die dreidimensionale Energieverteilung der Echos im Volumen der Waldbestände enthält, während die üblichen Gelände- und Oberflächenmodelle nur 2.5-dimensionale Darstellungen sind. Außerdem können die Wellenformdaten zur Darstellung von Schnitten durch den Wald genutzt werden. Diese Schnitte zeigen die vertikale oder horizontale Verteilung der zurückgestreuten Laserenergie und damit die Verteilung der Biomasse in den Baumkronen.

Zur ganzheitlichen fernerkundlichen Beschreibung von Wäldern bietet sich die Fusion unterschiedlicher Datenquellen wie Laserscanning mit passiven Daten an (ANDERSEN et al. 2008, KOCH et al. 2008). Während passive Fernerkundungsdaten, insbesondere Hyperspektraldaten, die spektrale Verteilung der Reflexion abbilden, aus der sich beispielsweise Pigment- und Wassergehalte ableiten lassen, erfassen aktive Sensoren wie Laserscanner oder Radar-Sensoren andere Größen, insbesondere solche, die mit der Struktur der erfassten Objekte zusammenhängen. Daher sollen in dieser Arbeit zusätzlich Möglichkeiten untersucht werden, um Laserscanning mit passiver Fernerkundung zu verbinden. Vom Untersuchungsgebiet liegt außer dem Laserscanning-Datensatz auch ein hyperspektrales Bild vor. Einerseits werden beide Datenquellen zu gemeinsamen Bilddatensätzen fusioniert, andererseits werden Laserscanningdaten zur Festlegung struktureller Forstparameter genutzt, um bei der Extraktion von Informationen aus Hyperspektraldaten durch Inversion von Bestandsreflexionsmodellen zu helfen.

Die Arbeit gliedert sich in sechs Kapitel. Nach einer kurzen Beschreibung des verwendeten Materials und der Untersuchungsgebiete (Kapitel 2), werden die Grundlagen des Laserscanning und die Vorverarbeitung (Kapitel 3) sowie Nutzung und Auswertung von Laserscanning

zur Ableitung von strukturellen Parametern im Wald (Kapitel 4) vorgestellt. Das fünfte Kapitel befasst sich mit der Modellierung von Reflexionssignaturen im Wald und mit der Nutzung der Laserdaten für die Modellierung. Im sechsten Kapitel werden die Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick angestellt. In den Anhängen finden sich zusätzliche Informationen und Karten zu den dargestellten Ergebnissen.

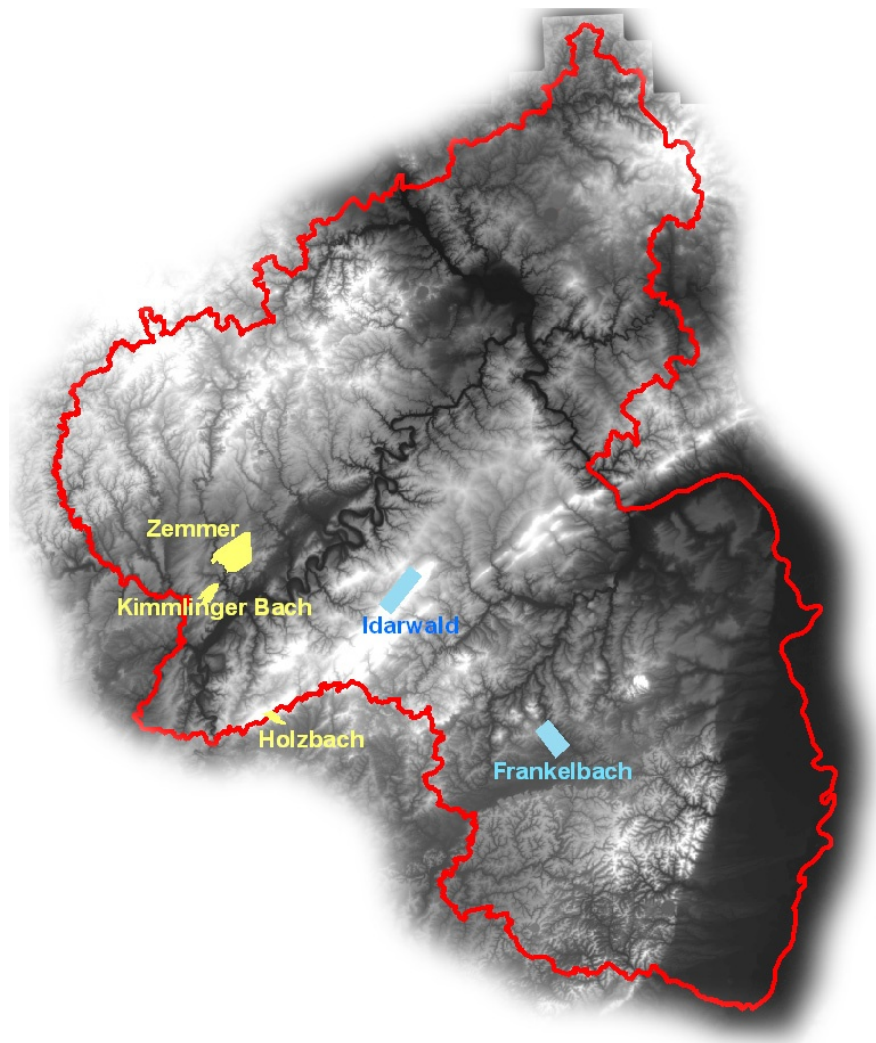


# Kapitel 2 Material

## 2.1 Das Untersuchungsgebiet

Als Untersuchungsgebiet wurde der Idarwald (49°45' N, 7°10' E) bei Morbach in Rheinland-Pfalz an der Grenze der Landkreise Bernkastel-Wittlich und Birkenfeld ausgewählt. Hier wurden bereits von VOHLAND (1997) sowie im Rahmen des Sonderforschungsbereich 522 „Umwelt und Region“ (SCHLERF et al. 2002) und in weiteren Arbeiten des Fachs Fernerkundung der Universität Trier (z. B. ATZBERGER & WERNER 1998, SCHLERF et al. 2003, BUDDENBAUM et al. 2005, SCHLERF & ATZBERGER 2006, SCHLERF et al. 2010) Forschungen angestellt.

Der Idarwald liegt im westlichen Hunsrück am nordwestlichen Hang des Hunsrückhöhenzuges, eines in NE-SW-Richtung streichenden Härtingsrückens. Er hat eine Fläche von ca. 7500 ha. Klimatisch herrschen in dem Gebiet maritime Einflüsse mit Westwinden vor. Luv-



**Abbildung 1:** Die Untersuchungsgebiete in Rheinland-Pfalz. Die Gebiete der Befliegung 2005 sind blau dargestellt, die der Befliegung 2007 in gelb.

effekte verursachen an den Westhängen einen relativ hohen jährlichen Niederschlag von 800–1000 mm. Die mittlere Jahrestemperatur beträgt 6.5°C, wobei das Maximum im Juli liegt und das Minimum im Januar. In den Wintermonaten sind Frost und Schneefall häufig (Arbeitskreis Standortkartierung 1985). Topographisch wird das Gebiet von Resten von Rumpfflächen und Quarzitrüben mit einer Höhe von bis zu 770 m ü. NN. charakterisiert. Der geologische Untergrund besteht aus devonischem Taunusquarzit und Hunsrückschiefer. Lößeintrag und Solifluktion im Pleistozän hatten einen großen Einfluß auf die Bodenbildung. Die vorherrschenden Böden sind Ranker, Podsole und podsolige Braunerden. Die Böden sind arm an Nährstoffen und teilweise versauert (REICHERT & STETS 1980, Arbeitskreis Standortkartierung 1985).

Die potentielle natürliche Waldgesellschaft ist ein Luzulo-Fagetum typicum (Hainsimsen-Buchen-Wald), aber Aufforstungen seit dem 18. Jahrhundert haben zu einer Verbreitung der Fichte geführt. Die heute vorherrschenden Baumarten sind die gemeine Fichte (*Picea abies*), die Rotbuche (*Fagus sylvatica*), die Traubeneiche (*Quercus petraea*) und die Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*). 53 % der Waldfläche wird von Fichten eingenommen, 18 % von Buchen, 10 % von Eichen und 5 % von Douglasien (VOHLAND 1997).

## 2.2 Verwendete Daten

### 2.2.1 Laserscannerdaten

Es standen fünf Laserscannerdatensätze zur Verfügung, ihre räumliche Verteilung und Ausdehnung kann Abbildung 1 entnommen werden. Im September 2005 wurden die Gebiete Idarwald und Frankelbach/Otterbach beflogen, im Sommer 2007 Zemmer, Newel/Kimmlinger Bach und Holzbach. Die Auswertungen in der vorliegenden Arbeit wurden mit dem Datensatz Idarwald durchgeführt. Eine detaillierte Beschreibung des Datensatzes ist in Abschnitt 3.3 zu finden.

### 2.2.2 Hyperspektrale Fernerkundungsdaten

Hyperspektrale Fernerkundungssensoren (*Imaging Spectroscopy*, VANE & GOETZ 1988, GOETZ 2009) nehmen Bilder in einer großen Anzahl von (üblicherweise über 40) schmalen (meist 10 bis 20 nm) und kontinuierlichen (also ohne große Lücken oder Überlappungen) Spektralkanälen auf. So liegen pixelweise Reflexionsspektren vor, die direkt mit Labor- oder Geländemessungen verglichen werden können (VAN DER MEER & DE JONG 2001).

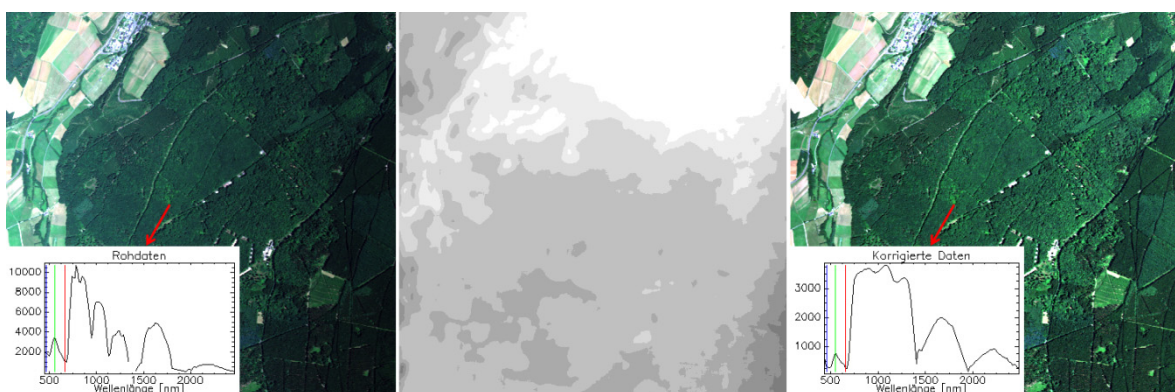
Als Hyperspektraldatensatz wird ein im Juli 2003 aufgenommener HyMap-Bildstreifen verwendet. Der HyMap-Sensor wurde von Integrated Spectronics in Australien gebaut und nimmt als optomechanischer Sensor Daten quer zur Flugrichtung durch mechanische Scambewegungen und entlang der Flugrichtung durch die Bewegung des Trägerflugzeugs auf. Der Öffnungswinkel eines Pixels (*Instantaneous Field of View*, IFOV) beträgt in Flugrichtung 2.5 mrad und quer zur Flugrichtung 2 mrad. Die Streifenbreite des Whiskbroom-Scanners liegt bei 512 Pixeln, so dass der gesamte Öffnungswinkel (*Field of View*, FOV) ca. 60° beträgt.

Der Sensor wurde in ca. 2000 m Höhe über Grund geflogen und hat so einen Streifen von 2.3 km Breite mit einer Bodenauflösung von 5 m pro Pixel aufgenommen. Das System deckt den Wellenlängenbereich von 0.45 bis 2.48  $\mu\text{m}$  mit einer spektralen Auflösung von 13–17  $\mu\text{m}$  in 126 Kanälen ab, wobei es in den von atmosphärischem Wasserdampf dominierten Wellenlängenbereichen um 1.45 und 1.95  $\mu\text{m}$  Lücken gibt. Das Signal-Rausch-Verhältnis liegt typischerweise bei über 500:1 (COCKS et al. 1998). Von den 126 gelieferten Kanälen wurden aufgrund eines schlechten Signal/Rausch-Verhältnisses vier aussortiert, so dass der verwendete Datensatz 122 Spektralkanäle enthält.

### Radiometrische Korrektur

Die Befliegung wurde in Richtung SW-NE durchgeführt, während die Sonne im SE stand. Somit lag die Across-Track-Beobachtungsrichtung nahe an der Principal Plane (siehe Abbildung 56), wodurch deutliche direktionelle Beleuchtungseffekte auftreten. Der HyMap-Bildstreifen liegt in zwei Versionen radiometrischer Bearbeitung vor: Eine Version wurde in einer Across-Track-Beleuchtungskorrektur (SCHLERF et al. 2005) von direktionellen Beleuchtungseffekten befreit; diese Version ist beispielsweise für Klassifikationsfragestellungen geeignet. Bei der zweiten Version wurden die Beleuchtungseffekte nicht korrigiert; diese ist zur detaillierten Reflexionsmodellierung unter Berücksichtigung der Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie geeignet.

Die eigentliche radiometrische Korrektur erfolgte mit dem in der Abteilung Fernerkundung der Universität Trier entwickelten Programm AtCPro, Version 3.01. In einem modifizierten 5S-Ansatz (TANRÉ et al. 1990) wurden die Daten atmosphärisch korrigiert und in Reflexionswerte umgerechnet (HILL & STURM 1991, HILL 2002). Der Wasserdampfgehalt der Atmosphäre wurde dabei aus den Bilddaten räumlich verteilt geschätzt (HILL & MEHL 2003). Bei der parametrischen Atmosphärenkorrektur wurden im Gelände zeitgleich zum Überflug gemessene Referenzspektren zur Kalibrierung und Validierung genutzt. Abbildung 2 zeigt einen Ausschnitt des HyMap-Bildstreifens vor und nach der radiometrischen Korrektur jeweils mit dem Spektrum eines Pixels. In der Mitte ist für denselben Ausschnitt die räumlich differenzierte Wasserdampfschätzung abgebildet. Weitere Details zur Atmosphärenkorrektur sind in Anhang B zu finden.



**Abbildung 2:** Atmosphärenkorrektur des HyMap-Bildes. Links: Rohdatensatz, Mitte: Räumlich differenzierter Wasserdampfgehalt, Rechts: Atmosphärisch korrigiertes Bild.

## Geometrische Korrektur

Die Stabilität von flugzeuggestützten Systemen ist der von Satelliten immer unterlegen. Daher treten geometrische Verzerrungen auf, die durch Schwankungen in der Flugbahn und durch Lageänderungen des Flugzeugs (rollen, nicken und gieren), erzeugt werden. Diese Störungen können nicht durch traditionelle Verfahren, die auf Passpunkten (Ground Control Points, GCPs) beruhen, korrigiert werden, da die Flugzeugbewegungen nicht zufriedenstellend durch polynomiale Transformationen des Bildes ausgeglichen werden können (SCHLÄPFER et al. 1998). Stückweise polynomiale Korrekturansätze besitzen ein gewisses Potential für flugzeuggestützte Bilddaten, aber auch sie können nicht alle hochfrequenten Störungen beseitigen. Stattdessen ist eine pixelbasierte Korrektur zu bevorzugen, die die jeweilige Position und Lage des Flugzeugs bei der Aufnahme berücksichtigt (SCHLÄPFER & RICHTER 2002).

Die geometrische Korrektur der Bilddaten erfolgte mit der parametrischen Geocodierungssoftware PARGE (SCHLÄPFER et al. 1998). Dabei wurden die aufgezeichneten Daten des dGPS und des inertialen Navigationsgeräts im Flugzeug sowie Bodenkontrollpunkte und ein digitales Höhenmodell des Untersuchungsgebiets genutzt. Es stand ein Höhenmodell vom Landesvermessungsamt Rheinland-Pfalz mit 20 m geometrischer Auflösung zur Verfügung, das durch bilineare Interpolation auf die Bildauflösung des HyMap-Datensatzes von 5 m umgerechnet wurde.

Die Prozessierung läuft bei PARGE in den folgenden Schritten ab:

- Berechnung der Beobachtungsgeometrie unter Annahme einer flachen Geländeoberfläche.
- Bestimmung des Schnittpunktes mit der wahren Oberfläche.
- Transformation der Bildkoordinaten; die Pixelkoordinaten des Bildes werden in eine Matrix in der Geometrie des DHM an die Positionen der Schnittpunkte geschrieben. Das Resultat ist ein „*remapping array*“, welches die Indizes der Koordinaten des Rohbildes an den korrekten Positionen des DHM enthält
- Füllung der Lücken; es werden Triangulations- und *nearest-Neighbour*-Techniken verwendet, um ein lückenloses Bild zu erzeugen. Durch die Flugzeugbewegungen ist es unvermeidlich, dass Teile der Bilddaten mehrfach auf einen Punkt abgebildet werden, während andere Bereiche des *remapping array* leer bleiben. Diese Lücken müssen mit Hilfe von Bildbearbeitungstechniken aufgefüllt werden.
- Im letzten Schritt wird das *remapping array* verwendet, um Kanal für Kanal das Ergebnisbild zu erzeugen. Aus dem *remapping array* kann direkt abgelesen werden, welcher Grauwert aus dem Originalbild an jede Stelle des Ergebnisbildes geschrieben werden soll. Dieser Schritt erfolgt getrennt von der Hauptprozessierung, so dass auch einzelne Kanäle oder weitere Bearbeitungsstufen des Ausgangsdatensatzes projiziert werden können, ohne dass das *remapping array* neu berechnet werden muss (SCHLÄPFER et al. 1998).

Die Daten wurden in das Gauß-Krüger-Koordinatensystem, Zone 2 mit Bessel-Ellipsoid und Potsdam-Datum, projiziert. In dieser Projektion liegen der Laserscanning-Datensatz und das Forst-GIS (siehe nächster Abschnitt) vor.

### 2.2.3 Forstinformationssysteme

Als Referenzdatensatz stehen zwei Forstinformationssysteme zur Verfügung: das von den Landesforsten Rheinland-Pfalz erstellte Waldökologische Forstinformationssystem (Wöfis) und ein Forstliches Geographisches Informationssystem (FoGIS), welches die Forsteinrichtungsdaten zum Stichtag 01.10.1994 enthält. Das FoGIS deckt nahezu den gesamten HyMap-Flugstreifen ab. Die wesentlichen Informationen sind bestandsweise Daten zur Baumartenzusammensetzung und zur Altersstruktur der Bäume (VOHLAND 1997). Die FoGIS-Informationen dienen als Grundlage für die Auswahl und Benennung der im Gelände vermessenen Bestände, außerdem sind die Altersangaben aus FoGIS entnommen.

### 2.2.4 Geländemessungen

Bei Geländemessungen im September 2005 wurden 15 Fichtenbestände und 13 Buchenbestände allometrisch vermessen. In den meisten Beständen wurden 30 m × 30 m großen Flächen abgesteckt, bei sehr dichten Beständen wurden die Untersuchungsflächen auf 15 m × 15 m reduziert. In den abgesteckten Quadraten wurden die Bäume gezählt, um die Stammzahl pro Hektar bestimmen zu können. Bei jeweils fünf dominanten Bäumen wurden die Baumhöhen und Kronenuntergrenzen mit einem Haga Höhenmesser (Haga GmbH & Co. KG, Nürnberg) gemessen, außerdem der Kronendurchmesser in Richtung der maximalen und der minimalen horizontalen Ausdehnung der Krone. Bei 10 Bäumen wurde der Brusthöhenumfang BHU in ca. 1.30 m Höhe mit einem Maßband bestimmt. Der Blattflächenindex (Leaf Area Index, LAI) wurde an 10 Positionen im Bestand mit Hilfe eines LiCor LAI-2000 Plant Canopy Analyzers ermittelt. Des Weiteren wurden je Bestand mit einer Fischaugenlinse neun hemisphärische Fotos aufgenommen, um den Kronenschlussgrad zu bestimmen. Zusätzlich wurden der Kronenschlussgrad und der Bedeckungsgrad der Bodenvegetation visuell geschätzt. Auf einige der Geländemessungen wird im folgenden detaillierter eingegangen. Die Messwerte sind in Anhang A aufgeführt, jeweils für die Bestände gemittelt. Weitere Informationen zur terrestrischen Vermessung von Waldbeständen können beispielsweise VAN LAAR & AKÇA (2007) und KÖHL et al. (2006) entnommen werden.

#### **Funktionsweise LiCor PCA**

Der LiCor Plant Canopy Analyzer ist ein Messinstrument, das den effektiven LAI durch Messungen der diffusen solaren Einstrahlung über und unter einem Bestand misst (WELLES & NORMAN 1991, JONCKHEERE et al. 2004). Dabei wird die einfallende Strahlung im Wellenlängenbereich von 320 bis 490 nm mit einer Fischaugenlinse in einem Zenitwinkel bis zu 74° gemessen. Das Blickfeld ist in mehrere konzentrische Ringe mit den Blickwinkeln 0–13°, 16–28°, 32–43°, 47–58° und 61–74° aufgeteilt (RAUTIAINEN et al. 2007). Das azimutale Blickfeld kann mit schwarzen Aufsätzen von 360° auf 270° oder geringere Winkel reduziert werden, um beispielsweise den Bediener des Geräts oder die Sonne aus dem Blickfeld auszuschließen.

Aus  $T_i$ , dem Verhältnis der Einstrahlung unter dem Bestand und über dem Bestand in den fünf Ringen mit den Blickwinkeln  $\theta$ , wird der LAI berechnet (CHEN & CIHLAR 1999, WELLES & NORMAN 1991):

$$\text{LAI} = 2 \sum_{i=1}^5 -\ln(T_i) \cos \theta_i \sin \theta_i d\theta_i. \quad (2-1)$$

Die Berechnungen gehen dabei von vier Annahmen aus: (1) Blätter sind Schwarzkörper, die die gesamte sie treffende Strahlung absorbieren, (2) die Absorber sind zufällig im Bestand verteilt, (3) die Projektionen der Pflanzenelemente sind einfache konvexe Formen und (4) die Pflanzenelemente sind klein im Vergleich zur beobachteten Fläche je Ring (JONCKHEERE et al. 2004).

Die Messungen sollten bei bedecktem Himmel zeitgleich über und unter dem Bestand stattfinden. Da aufgrund der großen Baumhöhen Messungen über Waldbeständen sehr aufwendig sind, wurde stattdessen abwechselnd im Bestand und auf einer offenen Lichtung gemessen. Meistens war der Himmel nicht bedeckt, es wurde jedoch darauf geachtet, zwischen der Messung im Bestand und der Messung im offenen Gelände stabile Atmosphärenverhältnisse zu haben. Die Messungen wurden mit einem 270°-Blickwinkelreduzierer mit dem Rücken zur Sonne durchgeführt, so dass der Messkopf immer beschattet war.

Es ist zu beachten, dass immer nur ein effektiver LAI gemessen wird (WEISS et al. 2004). Der tatsächliche LAI wird tendenziell unterschätzt durch Klumpungseffekte, bei denen sich mehrere Blätter gegenseitig verdecken und überschätzt durch Stämme und Äste, die ebenso wie Blätter Licht absorbieren (SCHLERF et al. 2005). Beide Effekte sind schwer quantifizierbar und werden in der vorliegenden Studie nicht korrigiert.

### **Auswertung der hemisphärischen Fotos**

Hemisphärische Fotos sind ein geeignetes Mittel um Bestände und insbesondere die Verteilung von Lücken in der Belaubung zu charakterisieren (JONCKHEERE et al. 2004).

Zur Auswertung der bei der Geländekampagne im Herbst 2005 aufgenommenen sphärischen Fotos stand keine geeignete Software zur Verfügung, so dass in Matlab eine eigene graphische Benutzeroberfläche (GUI, *Graphical User Interface*, siehe Abbildung 3) entwickelt wurde. Ziel des Programms ist es, die Anteile von Vegetation und Himmel im Bild zu ermitteln.

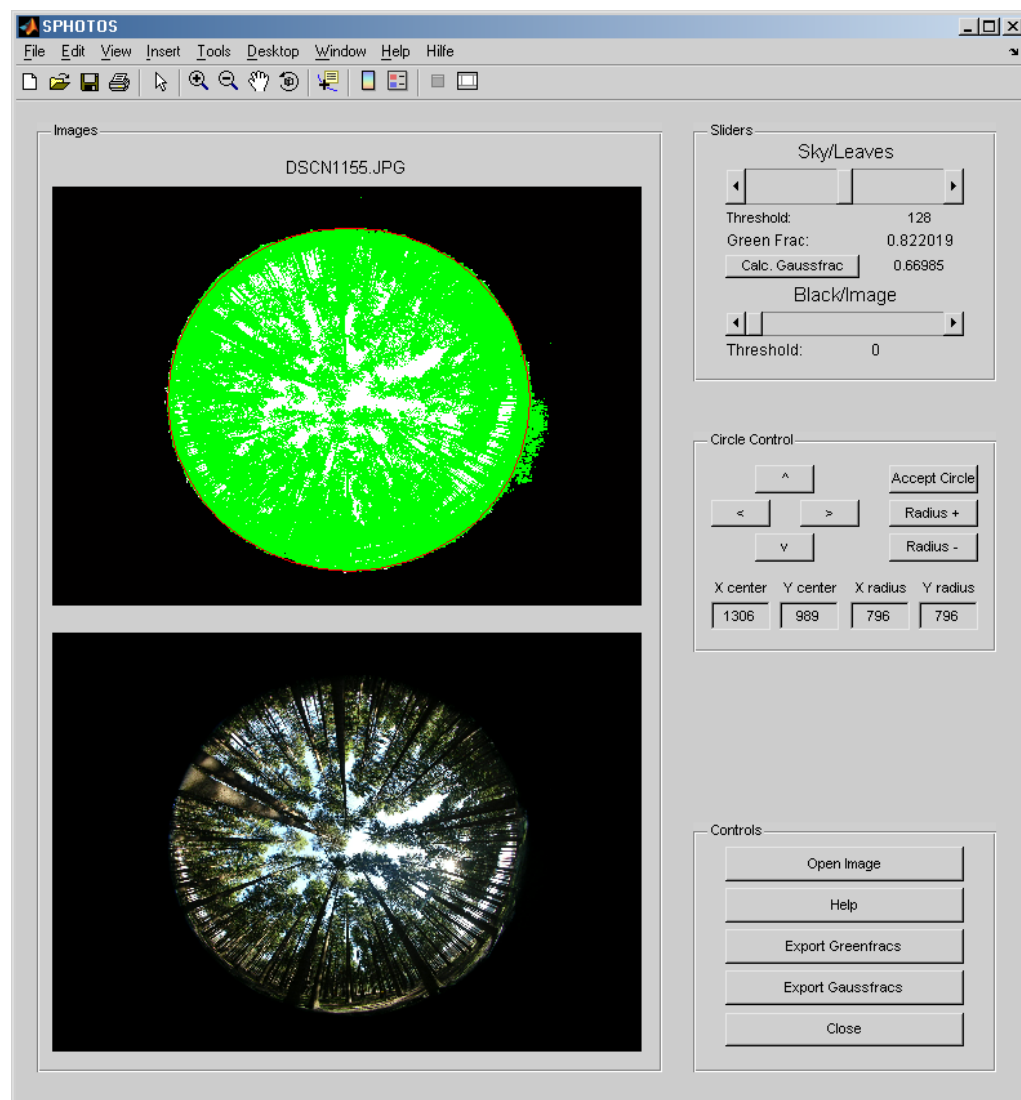
Der linke Bereich des GUI zeigt unten das Foto, welches gerade bearbeitet wird. Darüber wird das Ergebnis der Bearbeitungen graphisch angezeigt. Schwarze Flächen repräsentieren hier Bereiche außerhalb der kreisförmigen belichteten Fläche. Grüne Bereiche zeigen Vegetation (Stämme, Äste und Blätter), die weiße Fläche entspricht dem Himmel. Belichtete Bereiche außerhalb des kreisförmigen Bildes können ausgeblendet werden.

Der wichtigste Bearbeitungsschritt ist die Definition des Schwellenwertes, anhand dessen zwischen Vegetation und Himmel unterschieden wird. Dieser Schwellenwert ist eine Intensität im blauen Kanal des sphärischen Fotos, da hier Blätter und Himmel am besten unter-

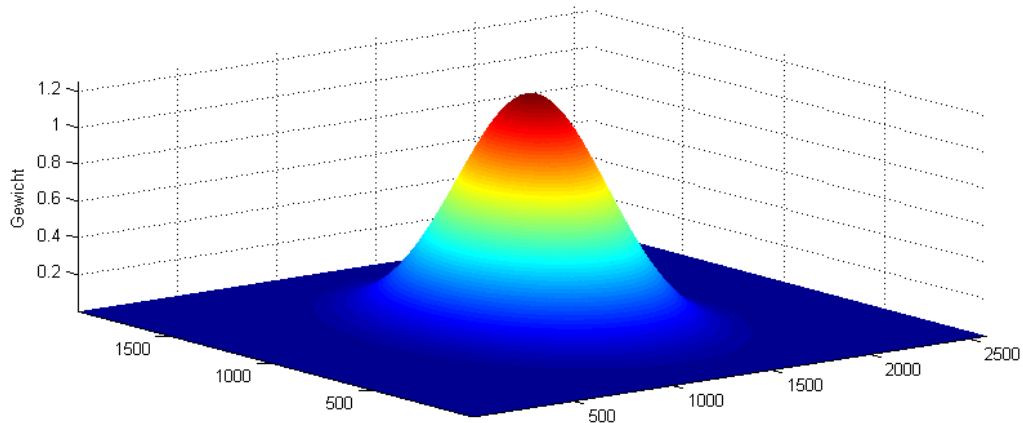
schieden werden können (HU et al. 2000, JONCKHEERE et al. 2004). Mit dem Schieberegler *Sky/Leaves* wird der Schwellenwert in der GUI eingestellt; für den aktuellen Wert berechnet das Programm den Vegetationsanteil der Kreisfläche und zeigt ihn als *Greenfrac* an.

Dieser Vegetationsanteil, also der Anteil der grünen Pixel an allen nichtschwarzen Pixeln im oberen Bild, ist allerdings keine geeignete Größe, um den Bedeckungsgrad im Bestand zu beschreiben. Durch die Fish-eye-Linse erhält der interessanteste Teil des Fotos, das Zentrum, eine relativ kleine Fläche. Um dies auszugleichen, kann ein weiteres Maß für die Vegetationsbedeckung berechnet werden: Mit dem Knopf *Calc. Gaussfrac* wird ein gewichteter Anteil der grünen Pixel berechnet, wobei eine zweidimensionale Normalverteilung für die Kreisfläche (Abbildung 4) die Gewichte bildet. Da üblicherweise in der Mitte des Bildes ein größerer Himmelsanteil als an den Rändern zu sehen ist, ist der Wert der *Gaussfrac* meist kleiner als der der *Greenfrac*.

Die Festlegung des Schwellenwertes ist ein subjektiver Schritt in der Bearbeitung, der großen Einfluß auf das Ergebnis hat. Da sich die Beleuchtungsverhältnisse zwischen den Aufnahmen unterscheiden, ist es nicht sinnvoll, hier einen festen Wert für alle Fotos zu verwenden. Statt-



**Abbildung 3:** Graphische Benutzeroberfläche zur Analyse sphärischer Fotos



**Abbildung 4:** Gewichte der Gaussfrac

dessen sollte der Wert sehr sorgfältig, möglichst unter Verwendung der Bildvergrößerung, eingestellt werden. Fotos mit starker Beeinflussung durch direkte Sonneneinstrahlung sollten nicht verwendet werden, da hier viele Blätter von der Sonne überstrahlt werden.

### Interkorrelation der Geländemessungen

In Tabelle 1 sind die Korrelationen zwischen den im Gelände erhobenen Größen aufgeführt. Die Signifikanz der Zusammenhänge wurde jeweils mit einem zweiseitigen t-Test bestimmt, wobei die Prüfgröße  $t$  aus der Korrelation  $r$  und dem Stichprobenumfang  $n$  nach

$$t = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (2-2)$$

berechnet wird. Der kritische t-Wert, mit dem die Prüfgröße verglichen wird, wird für die jeweilige Irrtumswahrscheinlichkeit  $p$  und  $n-2$  Freiheitsgrade bestimmt (BAHRENBERG et al. 1999).

Aus der Tabelle lässt sich entnehmen, dass zwischen den meisten Größen ein deutlicher Zusammenhang besteht, der häufig hoch oder höchst signifikant ist. So lassen sich beispielsweise aus der Baumhöhe alle anderen Größen relativ gut schätzen. Dies kann aus der Entwicklung des Waldes erklärt werden. Mit zunehmendem Alter werden die Bäume größer, die Stämme dicker und die Kronen mächtiger. Außerdem werden im bewirtschafteten Forst die Bestände ausgedünnt, so dass die Anzahl der Bäume pro Hektar, der Kronenschluss und der LAI in negativem Zusammenhang zur Höhe stehen. Die Zusammenhänge sind bei den untersuchten Fichtenbeständen ( $n=15$ ) deutlicher ausgeprägt als bei den Buchenbeständen ( $n=13$ ). Nicht alle Zusammenhänge sind linear – beispielsweise folgt die Entwicklung des LAI mit dem Alter einer deutlich komplexeren Kurve – aber trotzdem vermitteln die hier angegebenen linearen Korrelationsmaße einen guten Eindruck der Zusammenhänge zwischen den strukturellen Größen im Forst. Abbildung 5 zeigt als Beispiel für nichtlineare Zusammenhänge Höhenkurven, also den Zusammenhang zwischen Brusthöhendurchmesser  $DBH$  und Baumhöhe  $h$ , nach den gemessenen Geländedaten für Buchen und Fichten getrennt und gemeinsam. Es existieren zahlreiche Formeln, um den Zusammenhang mathematisch auszudrücken.



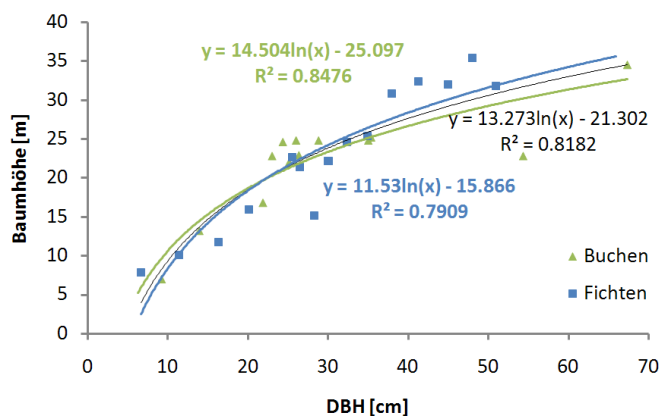
cken. Hier wird eine logarithmische Regression der Form  $h = b_0 + b_1 \cdot \ln(DBH)$  gewählt (VAN LAAR & AKÇA 2007). Der Zusammenhang ist für Buchen und Fichten ähnlich, so dass für eine Abschätzung die gemeinsame Regression gewählt werden kann.

**Tabelle 1:** Interkorrelationen der Geländemessungen

Alle Bäume								
	Alter	Anzahl	K'schluss	BHU	Höhe	Stammh.	K'länge	K'durchm
Alter	1							
Anzahl	-0.570**	1						
K'schluss	-0.437*	0.618***	1					
BHU	0.841***	-0.678***	-0.511**	1				
Höhe	0.667***	-0.760***	-0.651***	0.859***	1			
Stammh.	0.488**	-0.594***	-0.656***	0.657***	0.870***	1		
K'länge	0.611***	-0.666***	-0.379*	0.773***	0.762***	0.343'	1	
K'durchm.	0.844***	-0.589***	-0.143	0.794***	0.622***	0.333'	0.748***	1
LAI	-0.581**	0.642***	0.787***	-0.539**	-0.637***	-0.461*	-0.607***	-0.450*
Buchen								
	Alter	Anzahl	K'schluss	BHU	Höhe	Stammh.	K'länge	K'durchm
Alter	1							
Anzahl	-0.598*	1						
K'schluss	-0.470	0.627*	1					
BHU	0.878***	-0.604*	-0.343	1				
Höhe	0.622*	-0.850***	-0.499'	0.783**	1			
Stammh.	0.487	-0.741**	-0.448	0.445	0.747**	1		
K'länge	0.555*	-0.713**	-0.410	0.801***	0.914***	0.414	1	
K'durchm.	0.847***	-0.654*	-0.237	0.951***	0.772**	0.533'	0.733**	1
LAI	-0.506	0.625*	0.924***	-0.418	-0.610*	-0.497'	-0.533'	-0.325
Fichten								
	Alter	Anzahl	K'schluss	BHU	Höhe	Stammh.	K'länge	K'durchm
Alter	1							
Anzahl	-0.614*	1						
K'schluss	-0.766***	0.675**	1					
BHU	0.925***	-0.783***	-0.768***	1				
Höhe	0.929***	-0.743**	-0.837***	0.958***	1			
Stammh.	0.868***	-0.667**	-0.826***	0.874***	0.944***	1		
K'länge	0.688**	-0.624*	-0.553*	0.776***	0.745**	0.484'	1	
K'durchm.	0.864***	-0.790***	-0.636*	0.931***	0.893***	0.734**	0.887***	1
LAI	-0.679**	0.699**	0.875***	-0.698**	-0.707**	-0.586*	-0.692**	-0.657**

Signifikanz: \*\*\*  $p < 0.001$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*  $p < 0.05$ , '  $p < 0.1$ .

Abkürzungen: K'schluss: Kronenschluss, BHU: Brusthöhenumfang, Stammh.: Stammhöhe, K'länge: Kronenlänge, K'durchm: Kronendurchmesser. Alter laut FoGIS.



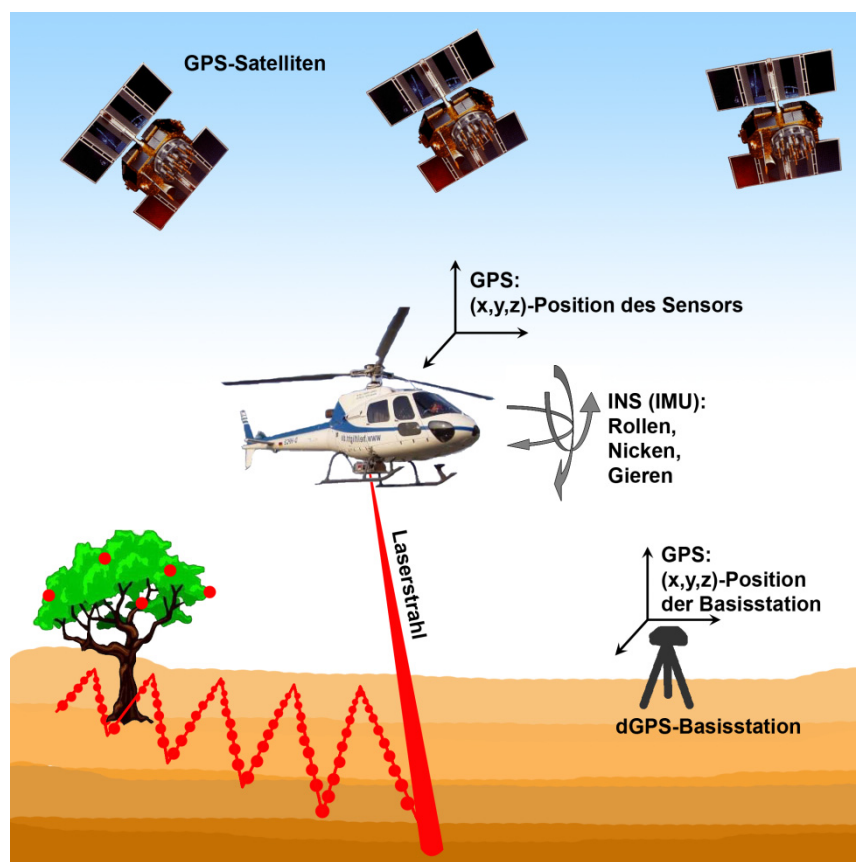
**Abbildung 5:** Höhenkurven nach den Geländemessungen für Buchen (grün), Fichten (blau) und alle Bäume (schwarz).

In den folgenden Kapiteln dienen die beschriebenen Geländemessungen als Referenzwerte für fernerkundlich abgeleitete Forstparameter. Dabei ist zu beachten, dass auch die Genauigkeit der Referenzmessungen immer begrenzt ist und nicht als absolute „*ground truth*“ angesehen werden sollte.

## Kapitel 3 Airborne Laserscanning

In den letzten Jahren hat sich luftgestütztes Laserscanning (*Airborne Laser scanning, ALS*) bzw. LiDAR (*Light Detecting And Ranging*, im folgenden „Lidar“) als zuverlässiges Werkzeug zur Bereitstellung hochaufgelöster, präziser, dreidimensionaler Information etabliert (NÆSSET 2009a).

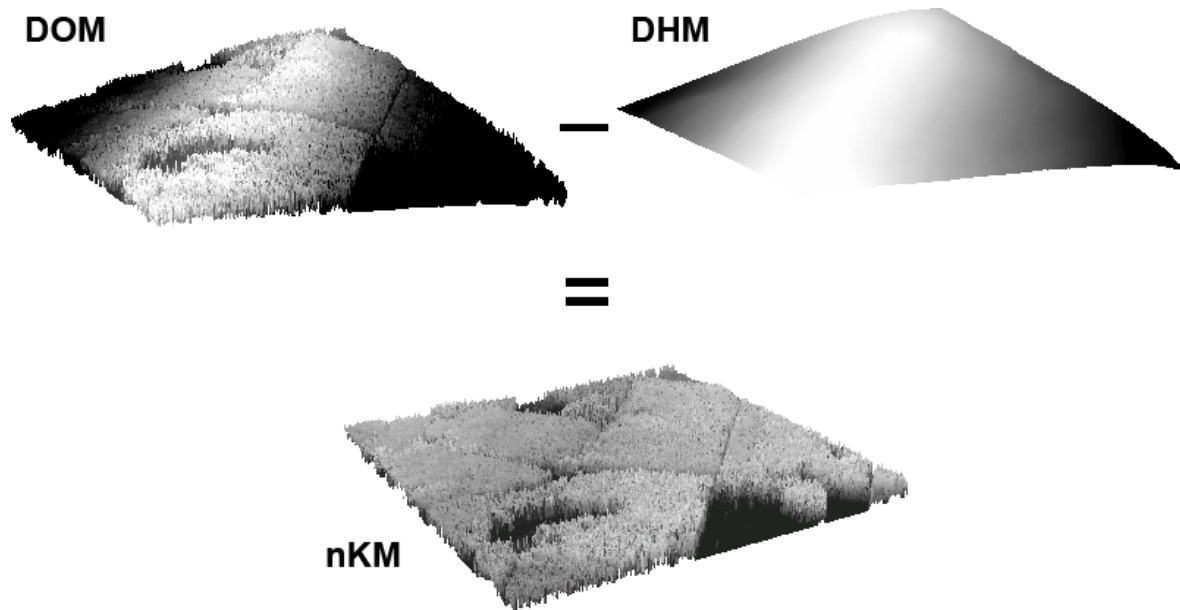
Detaillierte Informationen über die Zusammensetzung von Waldbeständen und über die Oberfläche der Erde spielen eine wichtige Rolle u.a. beim Forstmanagement und bei der Hochwasservorsorge. Ein geeigneter Weg, um genaue Höheninformationen im Wald flächendeckend zu erhalten, ist Laserscanning. Es kann zwischen terrestrischem, luftgestütztem und satellitenbasiertem Laserscanning unterschieden werden. Nach der Größe des am Boden ankommenden „Fußabdrucks“ des Laserstrahls wird zwischen *Small-Footprint*-Systemen mit einem Fußabdruckdurchmesser unter einem Meter und *Large-Footprint*-Systemen mit größeren Durchmessern unterschieden (HYDE et al. 2005). Eine weitere Differenzierung ist zwischen Einzelpulssystemen und sogenannten *Continuous-Wave*-Systemen, die einen dauerhaften Laserstrahl aussenden, möglich (THIEL & WEHR 1999). Diese Arbeit befasst sich ausschließlich mit luftgestütztem, gepulstem *Small-Footprint*-Laserscanning.



**Abbildung 6:** Die Verortung der Laserpunkte erfolgt durch Aufzeichnung der Scanrichtung, ein inertiales Navigationssystem und differentielles GPS

Luftgestütztes Laserscanning ist eine aktive Fernerkundungstechnik, bei der kurze Laserlichtpulse von einem Flugzeug oder einem Hubschrauber in Richtung Erdoberfläche abgestrahlt werden. Werden die Laserpulse nur entlang des Flugpfades abgestrahlt, spricht man von *Laser Profiling*. Beim Laserscanning dagegen werden die Laserpulse quer zum Flugpfad verteilt, während das Flugzeug sich vorwärts bewegt (NÆSSET & GOBAKKEN 2008), so dass nicht nur linienhafte Profile, sondern ganze Flächen abgedeckt werden. Hier kann zwischen der Erfassung der Fläche im Zickzack-Muster, in parallelen Linien, ellipsenförmiger und sinusoidaler Abtastung unterschieden werden (KIM et al. 2003). Die Laserpulse werden von der Oberfläche reflektiert, und der zum Sensor zurückgestrahlte Teil der Reflexion wird vom Instrument aufgezeichnet, wenn seine Intensität eine Rauschschwelle überschreitet. Das Lidar-Instrument misst die Laufzeit zwischen Abstrahlung und Empfang des reflektierten Pulses, so dass bei bekannter Lichtgeschwindigkeit die Distanz zwischen dem Instrument und der reflektierenden Oberfläche bestimmt werden kann (BALTSAVIAS 1999b). Die dreidimensionale Position dieses Punktes kann nur berechnet werden, wenn die Position und Ausrichtung des Laserscanners relativ zu einem Koordinatensystem zum Zeitpunkt der Messung bekannt sind. Um also genaue Messungen durchführen zu können, muss der Laserscanner mit einem Positionierungs- und Orientierungssystem (POS) ausgerüstet sein. Da die Genauigkeit moderner Laserscanner in Zentimeterbereich liegt, sollte die Genauigkeit des POS mindestens ebenso hoch sein. Das POS besteht aus zwei Komponenten: Die genaue Position des Instruments wird während des Überflugs mit Hilfe von differentielltem GPS (*Global Positioning System*), die Ausrichtung des Flugzeugs mit einer *Inertial Measurement Unit* (IMU, auch *Inertial Navigation System* INS, WEHR & LOHR 1999) gemessen. Das differentielle GPS besteht aus der Basisstation, einem am Boden installierten und genau eingemessenen GPS-Empfänger, und einem GPS-Empfänger an Bord des Flugzeugs. Durch Verrechnung der Signale an beiden Empfängern können Ungenauigkeiten im GPS-Signal ausgeglichen werden, so dass die Position des Flugzeugs mit hoher Genauigkeit bekannt ist. Üblicherweise wird die Position sekundlich aufgezeichnet, für die Zeitpunkte zwischen den Aufzeichnungen wird sie interpoliert. Moderne Laserscanner haben Pulsfrequenzen von 10 000 bis 200 000 Punkten pro Sekunde (HYYPÄ et al. 2008, HOPKINSON et al. 2008, KIM et al. 2003). Die IMU misst die Lage des Flugzeugs im Raum, indem die Roll-, Nick- und Gierwinkel mit Hilfe von Gyroskopen und Beschleunigungssensoren aufgezeichnet werden. Außerdem zeichnet das Lidar-System den Abstrahlwinkel jedes Pulses relativ zum Flugzeug auf. Durch Kombination dieser Informationen mit der Laufzeit des Laserstrahls kann für jeden Laserpunkt die dreidimensionale Position angegeben werden. Die Geocodierung der Daten erfordert dabei eine exakte Synchronisation der beteiligten Systeme (BALTSAVIAS 1999b).

Die räumliche Auflösung eines Bildes ist der kleinste Abstand, den zwei Objekte voneinander haben dürfen um noch als getrennte Punkte wahrgenommen zu werden. Bei Fernerkundungsdaten wird als räumliche Auflösung üblicherweise vereinfachend die Pixelgröße (*ground sampling distance*) verwendet (KRAUS 2004). Da beim Laserscanning keine Pixel sondern Einzelpunkte aufgezeichnet werden, wird stattdessen die Anzahl der Punkte pro Flächeneinheit als Auflösungsmaß verwendet. Aus den Punktdaten können Bilder in beliebiger Bildauflösung berechnet werden.

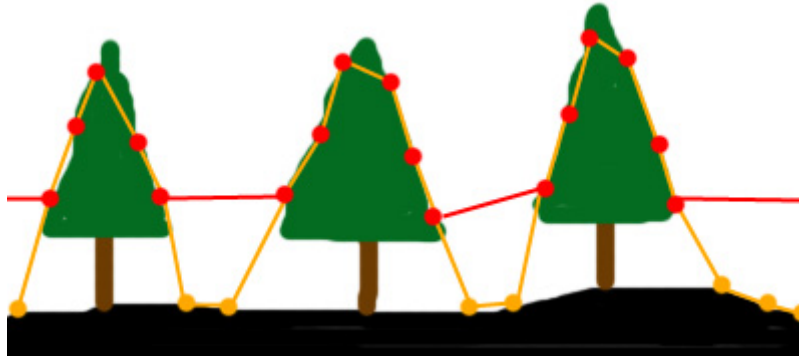


**Abbildung 7:** Aus der Subtraktion von Oberflächenmodell und Höhenmodell ergibt sich das normalisierte Kronenmodell

Ein Laserstrahl kann mehrfach reflektiert werden. Wenn der Strahl, der bis zum Boden auf einen Durchmesser von mehreren Dezimetern aufgefächert ist, auf erste Äste trifft, wird von dort bereits ein detektierbares Echo zurückgeworfen, ein Teil des Strahls dringt aber auch tiefer in den Bestand ein und wird entweder von dichterem Geäst oder vom Boden reflektiert (HUG et al. 2005).

Der Laserscanner zeichnet entweder diskrete Punkte oder den kontinuierlichen Verlauf der Intensität des Laserechos auf; letztere Systeme werden als *Full-Waveform*-Laserscanner bezeichnet. Während frühe Systeme meist entweder nur das erste oder das letzte Echo (*First Pulse* oder *Last Pulse*) aufzeichnen konnten, können aktuelle Systeme beide oder sogar zusätzlich noch dazwischenliegende Echos (*Intermediate Pulses*) registrieren (MALLETT & BRETAR 2009). Wenn nur ein einzelnes Echo registriert wird, wird dieses als *Only Pulse* gespeichert.

In der vorliegenden Studie lagen die Daten sowohl als Einzelpunktdaten als auch als *Full-Waveform*-Daten vor. Die Einzelpunktdaten wurden als *First Pulse*, *Last Pulse* und *Only Pulse* aufgezeichnet, des Weiteren wurden über eine Klassifikation Bodenpunkte identifiziert und als *Ground*-Datensatz geliefert. Durch Kombination von *First*- und *Only*-Datensatz kann ein Modell der Oberfläche (Digitales Oberflächenmodell, DOM, oder *Digital Surface Model*, DSM) erstellt werden (Abbildung 8, die *First Pulses* alleine haben in Baumzwischenräumen Lücken, die durch Interpolation aufgefüllt werden würden). Aus dem *Ground*-Datensatz wird ein Digitales Höhenmodell (DHM oder *Digital Elevation Model*, DEM) berechnet. Wird das DHM vom DSM subtrahiert, erhält man ein normalisiertes Modell der Oberflächenelemente (nDOM, bei Forstanwendungen auch normalisiertes Kronenmodell, nKM, genannt, siehe Abbildung 7). Für diese Differenzbildung und für die Verarbeitung der Daten als Bilddatensatz ist es notwendig, die in unregelmäßigen Abständen vorliegenden Punkte zunächst in ein regelmäßiges Raster zu interpolieren.



**Abbildung 8:** Durch Kombination der First (rot) und Only (gelb) Pulse wird das Oberflächenmodell erzeugt.

Zusätzlich zu den Positionen der rückstreuenden Objekte wird die Intensität jedes Laserechos aufgezeichnet. Die Intensität ist eine Funktion mehrerer Einflussfaktoren (WAGNER et al. 2008, DONOGHUE et al. 2007, COREN & STERZAI 2006):

- Der Intensität des ausgesandten Signals,
- des Reflexionsgrads des reflektierenden Objekts in der Wellenlänge des Lasers,
- der bidirektionalen Reflexionseigenschaften der Oberfläche,
- der Größe des reflektierenden Objekts, wenn diese kleiner als der Fußabdruck des Sensors ist,
- der Ausrichtung der reflektierenden Oberfläche,
- der Transmissivität durchdrungener Körper und
- der Entfernung zwischen Objekt und Sensor.

Das Zusammenspiel von Reflektivität, Objektgröße und Winkelabhängigkeit ist der Grund, weshalb Intensitätsinformationen nicht direkt mit passiven Fernerkundungsdaten vergleichbar sind (KATZENBEIßER & KURZ 2004, WAGNER et al. 2006). So gibt es beispielsweise in Lidar-Intensitätsbildern keine Schatten. Die Korrelation der Intensitätsdaten bei 1550 nm mit Reflexionsdaten der HyMap-Befliegung 2003 beträgt für HyMap-Kanal 73 (1543 nm) und für Kanal 74 (1556 nm) jeweils 0.56, während der Korrelationskoeffizient zwischen den beiden HyMap-Kanälen bei 0.9997 liegt. Auch BOYD & HILL (2007) konnten nur geringe Korrelationen zwischen HyMap-Daten und Lidar-Intensitätswerten finden.

Um die Komplexität des Zusammenhangs zwischen beobachteten Objekten und Signalstärke der reflektierten Wellenformen zu erfassen, wurden von einigen Autoren Ray-tracing-Simulationen des Lasersignals durchgeführt, wobei die oben dargestellten Einflussfaktoren auf die Intensität einzeln untersucht werden konnten (NI-MEISTER et al. 2001, RIAÑO et al. 2003, MORSDORF et al. 2007).

Mögliche Maße der Intensität sind der maximale aufgezeichnete Intensitätswert oder die Fläche eines Peaks im empfangenen Signal. Beim vorliegenden Datensatz ist die Intensität als das Produkt von Pulsbreite und Spitzenwert der Amplitude angegeben. Dabei wird davon ausgegangen, dass alle Einzelechos als gaußscher Impuls vorliegen, so dass das Produkt ein

Maß für die Fläche des Peaks ist. Des Weiteren wurden beim vorliegenden Einzelpunkt datensatz die Intensitätswerte mit dem Quadrat der Entfernung zwischen Ziel und Sensor skaliert, um die entfernungsabhängige Abschwächung des Signals zu kompensieren (KÖCHER 2007, persönliche Kommunikation).

Bei der Laserscanner-Befliegung von Waldflächen kann zwischen belaubten und unbelaubten (*leaf-on* und *leaf-off*) Bedingungen unterschieden werden (NÆSSET 2005, BRANDTBERG 2007, KIM et al. 2009). Insbesondere die Extraktion von Bodenpunkten und die Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen fallen bei unbelaubtem Zustand leichter. Da Laserscanner aktive Sensoren sind, können sie im Gegensatz zu passiven Sensoren, die für optimale Resultate auf hohe Sonnenstände angewiesen sind, auch problemlos im Winter eingesetzt werden, zumindest wenn keine mächtige Schneedecke vorhanden ist. Die in der vorliegenden Arbeit verwendeten Daten wurden im Sommer, also bei belaubtem Wald aufgenommen.

### 3.1 Entwicklung und Anwendungen von Laserscanning

Seit den 1960er Jahren wird *Laser Ranging* von der NASA verwendet, um die Distanz zu Reflektoren auf dem Mond zu messen, die während der Apollo-Mission aufgestellt wurden. HICKMAN & HOGG (1969) schlugen einen luftgestützten Laser zur Erkundung von Küstenbereichen vor. In den 1970er Jahren begann die Erforschung luftgestützter *Laser-Profiler* für ozeanographische und bathymetrische Anwendungen (CRACKNELL & HAYES 1991, HYYPPÄ et al. 2008), ab den 1980er Jahren auch für Forstanwendungen.

Die meisten Anwendungen von Lidar liegen im Forstbereich, aber die Technik wurde auch für Bathymetrie, Überflutungsrisikokartierung, Vogelpopulationskartierung, Eisausdehnungskartierung, Pestizidanwendung, Geländemodellierung, Landbedeckungsklassifikation, zur Entdeckung invasiver Arten, zur Kartierung von Überlandleitungen und für einige atmosphärische und meteorologische sowie Anwendungen im Weltraum genutzt (HILL et al. 2000, KIM et al. 2003, DUONG et al. 2006, ASNER et al. 2008).

#### **Laser-Profiler**

Erste Untersuchungen zum Potential flugzeuggestützter Laseraltimeter für forstliche Anwendungen fanden bereits in den 1980er Jahren statt. ARP et al. (1982) konnten mit einem Laserprofiler ein tropisches Waldgebiet und Wasserreservoirs in Venezuela vermessen. NELSON et al. (1984) verwendeten einen Laserprofiler, der Profile mit 400 Punkten/s aufnehmen konnte. Aus diesen Profilen wurden bereits mit recht hoher Genauigkeit Baumhöhen und Bestandslückenanteile abgeleitet. Weil GPS noch nicht zur Verfügung stand, war eins der Hauptprobleme, das Profil in Luftbildern zu lokalisieren und aus den Luftbildern Referenzhöhen abzuleiten. SCHREIER et al. (1985) verwendeten einen Laserprofiler mit 2000 Pulsen/s, von denen nur jeder fünfte verwendet werden konnte, zur Unterscheidung von Baumarten. NELSON et al. (1988) leiteten aus Daten eines Laser-Profilers Biomasse und Holzvolumen ab. RITCHIE et al. (1993) maßen mit 4000 Pulsen/s verschiedene Vegetations- und Landschaftseigenschaften. BLAIR et al. (1994) optimierten ein luftgestütztes Large-Footprint-Laseraltimeter

zur Vermessung von Vegetation, indem sie es um Wellenformaufzeichnung erweiterten. Inzwischen sind Laser-Profiler fast komplett durch Laserscanner abgelöst, werden aber noch immer vereinzelt eingesetzt (z.B. WULDER et al. 2007).

### **Luftgestütztes Laserscanning**

Ab Mitte der 1990er Jahre waren GPS-Systeme zur Positionsbestimmung und inertielle Navigation zur Bestimmung der Fluglage verfügbar, so dass der Bau von Laserscannern zur flächenhaften Abtastung möglich wurde. KILIAN et al. (1996) nutzten GPS, INS und einen Toposys-Laserscanner, um Höhendaten flächenhaft zu erfassen. NILSSON (1996) konnte mit einem hubschraubergestützten System mit GPS und einem Laserscanner, der im grünen und im nahinfraroten Bereich arbeitet, Baumhöhen und Bestandsvolumen flächenhaft schätzen. NÆSSET (1997a, b) nutzte einen Laserscanner mit 2000 Pulsen/s um die Höhe und das Holzvolumen einzelner Bestände zu vermessen und stellte Überlegungen an, die norwegische Forstinventur mit Laserscanning zu unterstützen. Seitdem wurde die Technik kontinuierlich verbessert. Inzwischen bieten Laserscanner Pulsraten von bis zu 200 kHz, so dass auch größere Flächen mit hohen Punktdichten erfasst werden können (NÆSSET 2009a). Die Entwicklung der Pulsaufzeichnung ging von *Single-Pulse*-Systemen über *Dual-Pulse*-Systeme zu *Multiple-Pulse*-Systemen und Wellenformaufzeichnung (MALLET & BRETAR 2009).

Alle bisher kommerziell verfügbaren Laserscanner arbeiten mit einer einzelnen Wellenlänge. MORSDORF et al. (2009) schlagen einen multispektralen luftgestützten Laserscanner mit Wellenformdigitalisierung vor, der in grünen, roten und nahinfraroten Wellenlängen weitere Fortschritte bei der Laserfernerkundung von Vegetationsbeständen bringen soll.

### **Weltraumgestütztes Laserscanning**

Bereits 1992 beschreibt GARDNER die notwendigen Spezifikationen satellitengestützter Laseraltimeter. Wichtig sind hohe Pulsenergie, eine geringe Strahlauffächerung und ein empfindlicher Sensor, möglichst mit großer Empfangsfläche.

Der bisher einzige weltraumgestützte Laserscanner ist seit 2003 GLAS (*Geoscience Laser Altimeter System*) auf dem Satelliten ICESat (*Ice, Cloud and land Elevation Satellite*) mit einem Footprint-Durchmesser von ca. 75 m und 175 m Abstand zwischen den Footprints. GLAS ist vor allem zur Messung der Eisdicke konzipiert, wurde jedoch auch für Forstanwendungen genutzt (DUONG et al. 2006, ROSETTE et al. 2009, DUNCANSON et al. 2010). Aufgrund der begrenzten Lebensdauer des Lasers werden die Daten nicht kontinuierlich erhoben, sondern in zwei bis drei einzelnen Kampagnen pro Jahr, die jeweils ca. einen Monat andauern. Von ursprünglich drei Lasern an Bord ist im Jahr 2009 noch einer funktionsfähig. Der Scanner sendet Pulse von ca. 6 ns Länge aus und zeichnet die zurückgestreuten Wellenformen auf (ZWALLY et al. 2002, ABSHIRE et al. 2005, HARDING & CARABAJAL 2005).

Als weiterer Laserscanner auf einem Satelliten war VCL (*Vegetation Canopy Lidar*) mit einem Footprint-Durchmesser von 25 m und Wellenformaufzeichnung (DRAKE et al. 2002, HESE et al. 2005) geplant, wurde bisher aber nicht realisiert.



### Terrestrisches Laserscanning

Beim terrestrischen Laserscanning wird der Scanner an einem festen Ort montiert und tastet die Umgebung ab. Der Scanner benötigt zur Erfassung von Flächen Ablenkmechanismen in zwei Richtungen, im Gegensatz zum Flugzeugscanner, der nur in eine Richtung bewegt werden muss (KRAUS 2004). Typisch für terrestrische Laserdaten sind sehr hohe Punktdichten, aber begrenzte Reichweite. Einsatzgebiet terrestrischer Laserscanner sind vielfältige Vermessungsaufgaben, beispielsweise in Vermessung von Kulturdenkmälern oder in der Architektur (Becker & Haala 2007, Akca & Grün 2007).

Terrestrische Laserscanner werden heute vielfach im Forst eingesetzt, um die Struktur einzelner Bäume oder kleiner Baumgruppen detailliert zu erfassen. DANSON et al. (2006) fanden hohe Übereinstimmungen zwischen der aus hemisphärischen Fotos und der aus terrestrischem Laserscanning abgeleiteten Bestandslückenverteilung. TANSEY et al. (2009) verwendeten einen terrestrischen Laserscanner, um Brusthöhendurchmesser, die Stammzahl pro Hektar und die Basalfläche mit hoher Genauigkeit, aber nur für ein kleines Gebiet zu bestimmen. VAN DER ZANDE et al. (2009) modellierten mit Hilfe von terrestrischem Laserscanning die Beleuchtung der Blätter in Baumkronen über den Tagesverlauf. Dabei konnten Verdunstungen modelliert werden, die gut mit Saftflussmessungen übereinstimmen, wobei die Schattenblätter einen größeren Beitrag zur Verdunstung leisteten als die Lichtblätter.

## 3.2 Physikalische Grundlagen

Laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*) sind Strahlungsquellen, die auf der von EINSTEIN (1917) theoretisch beschriebenen stimulierten Emission elektromagnetischer Strahlung beruhen. Normalerweise fallen angeregte Elektronen in der Hülle von Atomen sehr schnell unter Abgabe eines Photons in einen energieärmeren Zustand zurück (spontane Emission). Es gibt allerdings auch sogenannte „verbotene Übergänge“, die nur selten spontan ablaufen. Ein mit der richtigen Energiemenge angeregtes Atom geht in einen metastabilen Zustand über und fällt nicht sofort von alleine in den Grundzustand zurück. Wenn in einem Festkörper mehr Atome im angeregten als im Grundzustand vorliegen, spricht man von Inversion. Dieser Zustand ist für optische Laser erforderlich und wird durch „Pumpen“ von Energie in das Festkörpergitter erreicht. Wird ein metastabiles Atom von einem Photon getroffen, das genau die für den Übergang in den energieärmeren Zustand erforderliche Wellenlänge besitzt, fällt das Elektron auf das niedrigere Niveau und sendet ein identisches Photon aus. Das auslösende Photon bleibt erhalten, so dass eine Lichtverstärkung mit kohärenten Photonen auftritt. Die Photonen stimulieren andere Atome, auch in den Grundzustand zurückzufallen und Photonen auszusenden. Diese stimulierte Emission von Strahlung verleiht Laserlicht seine besonderen Eigenschaften, die es möglich machen, die für einen Laserscanner notwendigen sehr stark gebündelten Strahlungsquellen zu bauen. Technisch werden Laser realisiert, indem ein geeignetes Material – für Laserscanning im Infrarotbereich meist Nd:YAG (Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat) – in einem Resonator zwischen gegenüberliegenden Spiegel durch Energiezufuhr angeregt wird. Dabei durchläuft die Strahlung

immer wieder das Medium, bis durch die stimulierte Emission die gewünschte Intensität erreicht ist (MESCHEDE 2006).

### 3.2.1 Das Messprinzip

Die Messung der Distanz zwischen Sender, reflektierender Oberfläche und Empfänger erfolgt über Laufzeitmessung des Lichts. Für zufriedenstellende Ergebnisse sind also ein genaues Verständnis des Verhaltens des Lichts auf seinem Weg und – wegen der hohen Lichtgeschwindigkeit – sehr präzise Laufzeitmessungen notwendig.

Wenn das Echo empfangen wird, hat der Laserstrahl bereits Hin- und Rückweg zurückgelegt. Daher berechnet sich die Distanz  $R$  zum Ziel nach  $R = c_{Atm} \cdot \tau / 2$ , wobei  $c_{Atm}$  die Lichtgeschwindigkeit und  $\tau$  die Laufzeit des Signals ist. Die Lichtgeschwindigkeit in der Atmosphäre errechnet sich aus der Lichtgeschwindigkeit im Vakuum (299 792 458 m/s) dividiert durch den Brechungsindex der Luft (1.000292) (MESCHEDE 2006).

Der verwendete Laserscanner zeichnet die Full-Waveform-Informationen mit einer Samplingrate von einem Gigahertz auf, die Dauer  $\Delta\tau$  einer einzelnen Intensitätsaufzeichnung beträgt also eine Nanosekunde,  $10^{-9}$  s. Damit wird entlang des Laserstrahls eine Auflösung  $\Delta R$ , die auch als ein *Bin* bezeichnet wird, von ca. 15 cm erreicht:

$$\Delta R = \frac{c_{Luft} \cdot \Delta\tau}{2} = \frac{299\,792\,458 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot \text{s}}{1.000292 \cdot 2} = 0.14985 \text{ m} \quad (3-1)$$

Die Messung geht sehr schnell, daher sind hohe Pulsraten möglich. Während der Laufzeit des Strahls aus 750 m Flughöhe bewegt sich ein Flugzeug bei einer Geschwindigkeit von  $v = 60$  m/s nur um  $s = 2vR/c = 0.3$  mm vorwärts (BALTSAVIAS 1999b). Wenn jeweils ein Puls unmittelbar nach Empfang des vorherigen Pulses ausgesendet wird, liegt die maximal mögliche Pulsrate aus 750 m Flughöhe bei  $3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1} / 1500 \text{ m} = 200\,000 \text{ s}^{-1}$ .

### 3.2.2 Der „Fußabdruck“ des Laserstrahls

Trotz der starken Bündelung von Laserlicht fächert auch ein Laserstrahl beim Durchgang durch die Atmosphäre mit dem Winkel  $\gamma$  auf (COREN & STERZAI 2006). Typischerweise liegt dieser Winkel bei 0.2 bis 0.6 mrad (GOODWIN et al. 2006). Der Abdruck ist ungefähr kreisförmig und variiert mit  $R$ , der Distanz zwischen Sensor und Ziel, und dem momentanen Auslenkwinkel gegenüber Nadir  $\theta_{inst}$ . Im Nadir berechnet sich der Durchmesser des Fußabdrucks (*instantaneous Footprint*  $Fp_{inst}$ ) nach

$$Fp_{inst} = D + R \cdot \tan \gamma, \quad (3-2)$$

wobei  $D$  der Durchmesser des Strahls am Ausgang des Sensors ist, also die Apertur des Lasers.  $D$  ist üblicherweise vernachlässigbar klein und wird meistens bei der Berechnung des Fußabdrucks weggelassen. Da auch  $\gamma$  klein ist, kann, wenn es im Bogenmaß angegeben ist,

mit  $\tan \gamma \approx \gamma$  gerechnet werden, so dass der Durchmesser des Nadir-Footprints üblicherweise einfach als

$$Fp_{inst} = R \cdot \gamma, \quad (3-3)$$

angegeben wird, seine Fläche  $A_I$  als

$$A_I = \frac{\pi}{4} (R \cdot \gamma)^2. \quad (3-4)$$

Bei Schrägsicht auf ebenem Terrain wird der Fußabdruck elliptisch. Der mittlere Fußabdrucksdurchmesser kann als Funktion der Schrägdistanz  $R$  oder der Flughöhe über Grund  $h$  ausgedrückt werden:

$$Fp_{inst} = \frac{R}{\cos \theta_{inst}} \cdot \gamma = \frac{h}{\cos^2 \theta_{inst}} \cdot \gamma. \quad (3-5)$$

Zusätzliche Verformungen des Fußabdrucks kommen noch durch die Topographie zustande (BALTSAVIAS 1999b).

Bei dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten System mit einem maximalen Auslenkwinkel von  $22.5^\circ$ , einer Auffächerung von  $0.5 \text{ mrad}$  und einer Flughöhe von  $700 \text{ m}$  über Grund ergeben sich bei ebenem Gelände Fußabdruckdurchmesser von  $35 \text{ cm}$  im Nadir und  $41 \text{ cm}$  am Rand des Scanstreifens.

Der aufgefächerte Laserstrahl hat keine scharfe Grenze, so dass die Definition des Fußabdrucks nicht ganz trivial ist. GOODWIN et al. (2006), NI-MEISTER et al. (2001) und BLAIR & HOF-TON (1999) gehen auch von normalverteilter Energie im Fußabdruck mit höherer Energie im Zentrum und geringeren Werte am Rand aus. Der Auffächerungswinkel wird meist als Winkel der vollen Breite beim halben Maximum (*Full Width at Half Maximum*, FWHM) der Intensität definiert, folglich ist dies auch der gebräuchliche Durchmesser des Fußabdrucks.

Wenn sich mehrere Footprints überlagern, wird von *Oversampling* gesprochen, bei Lücken zwischen den Footprints von *Undersampling* (BALTSAVIAS 1999a, HÖFLE & PFEIFER 2007).

### 3.2.3 Die Energie des Laserstrahls

Der Bruchteil der ausgesandten Energie, die nach der Rückstreuung am Boden beim Empfänger ankommt, lässt sich mit Hilfe der Radargleichung abschätzen (BALTSAVIAS 1999b, MIKHAIL et al. 2001). Unter der Annahme eines diffus reflektierenden, ebenen Ziels, das rechtwinklig zum ankommenden Laserstrahl ausgerichtet ist, lassen sich die folgenden Werte berechnen:

Die Energiedichte  $\Theta_{tar}$  in der betrachteten Fläche (*target*) beträgt, wenn vereinfachend von einer einheitlichen Energieverteilung in der Fläche  $A_I$  ausgegangen wird,

$$\Theta_{tar} = \frac{P_T}{A_I} M, \quad (3-6)$$

wobei  $P_T$  die ausgesandte Energie ist und  $M$  die Transmissivität der Atmosphäre.

Bei angenommenem lambertschen Reflexionsverhalten, also gleichmäßiger Reflexion in alle Richtungen (NICODEMUS et al. 1977, KRAUS & SCHNEIDER 1988), beträgt damit die gesamte reflektierte Energie eines Ziels mit dem Reflexionsgrad  $\rho$

$$P_{refl} = \frac{\rho}{\pi} \Theta_{tar} A_I. \quad (3-7)$$

Die beim Empfänger ankommende Energie  $P_r$  auf der Empfangsfläche  $A_r$ , der Apertur des Sensors, beträgt somit

$$P_r = P_{refl} M \frac{A_r}{R^2}. \quad (3-8)$$

Werden diese Gleichungen kombiniert, ergibt sich für die Energie am Empfänger

$$P_r = \frac{\rho M^2 A_r}{\pi R^2} P_t. \quad (3-9)$$

Bei der klassischen Radargleichung (MIKHAIL et al. 2001) ist die empfangene Energie von der vierten Potenz der Distanz zwischen Sensor und Ziel abhängig, in der hier beschriebenen Form nur von der zweiten Potenz. Während bei Radarsystemen die Strahlung sowohl auf dem Hin- also auch auf dem Rückweg stark auffächert, ist der Laserstrahl bei Lidarsystemen auf dem Hinweg gebündelt und fächert nur auf dem Rückweg in den Halbraum auf.

Bei der verwendeten Wellenlänge von 1550 nm beträgt die Transmissivität der Atmosphäre bei durchschnittlichen Atmosphärenbedingungen für den einfachen Weg von der Atmosphärenobergrenze bis zur Meereshöhe ca. 99.7% (laut Daten einer ModTran-Simulation, BERK et al. 1998). Damit kann der Transmissivitätsterm  $M$  vernachlässigt werden, zumal der betrachtete Weg nur eine Länge von ca. 1400 m hat. Bei einer angenommenen Empfängerfläche von 10 cm × 10 cm, einer Flughöhe von 700 m und einem Ziel mit 50% Reflektivität ergibt dies, dass die empfangene Energie um den Faktor  $3 \cdot 10^{-9}$  schwächer als die ausgesandte Energie ist. Wird also beispielsweise ein Energiepuls von 2 kW mit 10 ns Länge ausgestrahlt, beträgt die ausgesandte Pulsenergie 20 μJ, die empfangene nur 60 fJ. Es gibt noch weitere Verluste, die durch die Gleichung nicht erfasst sind, beispielsweise durch die Sender- und Empfängeroptik und den Bandpassfilter am Empfänger, der den Einfluss von Hintergrundstrahlung reduziert (BALTSAVIAS 1999b).

Außer dem Reflexionsgrad ist vor allem die getroffene Flächengröße entscheidend für die reflektierte Energie. WAGNER et al. (2006 und 2008) definieren als Wirkungsquerschnitt  $\sigma_i$  die effektive Kontaktfläche zwischen Laserstrahl und dem  $i$ -ten getroffenen Objekt unter Berücksichtigung der Richtungsabhängigkeit der Rückstreuung und des Reflexionsgrades:

$$\sigma_i = \frac{4\pi}{\Omega_i} \rho_i A_i \quad (3-10)$$

mit  $\Omega_i$  als Raumwinkel der Streuung in Steradian. Glatte oder spiegelnde Oberflächen haben dabei kleine Streuwinkel, rauhe Oberflächen große. Bei einem lambertschen Reflektor beträgt der Streuwinkel  $\pi$ . Bei spiegelnden Oberflächen besteht eine sehr große Wahrscheinlichkeit, dass der reflektierte Strahl den Empfänger des Laserscanners verfehlt. Für flächige Ziele, die größer als der Fußabdruck sind, ist die Kontaktfläche genauso groß wie der Fußabdruck. Ansonsten gibt es mehrere Kontakte zwischen dem Strahl und Oberflächen, und die gesamte beleuchtete Fläche und der gesamte Wirkungsquerschnitt setzen sich aus den einzelnen Teilflächen zusammen:

$$A_I = \sum_{i=1}^n A_i, \quad \sigma_I = \sum_{i=1}^n \sigma_i. \quad (3-11)$$

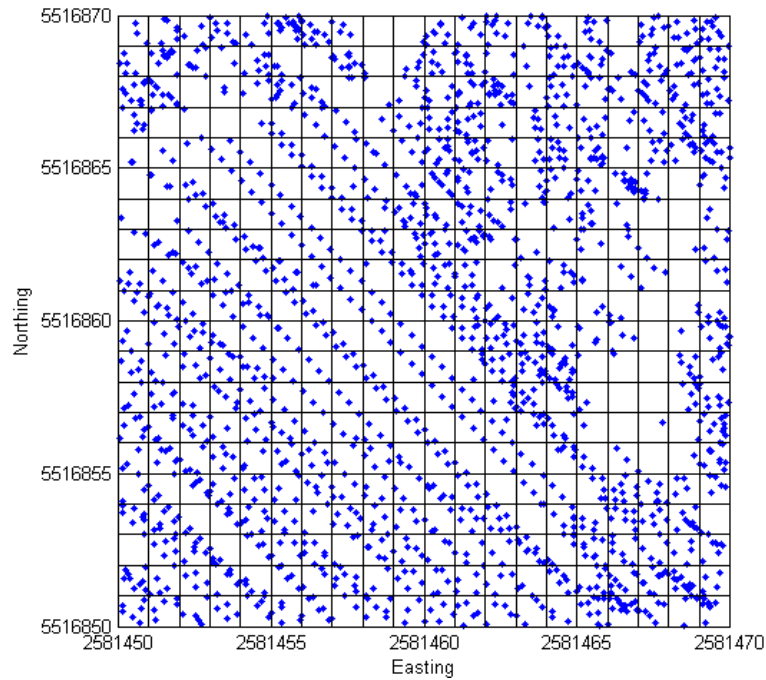
### 3.3 Der verwendete Datensatz

Der vorliegende Datensatz wurde von der Firma Hansa Luftbild mit dem Laser-Scanner-System LiteMapper 5600 der Firma Riegl aufgenommen. Dieses verwendet den RIEGL LMS-Q560 Laserscanner, eins der ersten kommerziellen Small-Footprint-Systeme mit Wellenformanalyse (HUG et al. 2005, RIEGER et al. 2006). Geflogen wurde mit einem Hubschrauber vom Typ Bell 206 Jet Ranger, ausgerüstet mit einem CCNS4/GPS-Navigationssystem. Die technischen Daten des Laserscanners können Tabelle 2 entnommen werden (HUG et al. 2005, Riegl 2006).

**Tabelle 2:** Technische Daten des verwendeten Laserscanners

Wellenlänge	1550 nm
Meßrate	bis zu 66 kHz
Scanrate	bis zu 160 Linien/s
Scanmethode	Rotierender vierseitiger Prismenspiegel
Höhengenaugigkeit	+/- 2 cm
Lagegenauigkeit	+/- 30 cm
Wellenform-Sampling-Intervall	1 ns
Auffächerung des Laserstrahls	0.5 mrad
Scanwinkel	+/- 22.5°
Scanwinkelgenauigkeit	0.0025°

Der Datensatz wurde im September 2005 befliegen. Die Flughöhe über Grund lag bei ca. 700 m. Die Fläche im Idarwald wurde durch den Helikopter in 10 Flugstreifen abgetastet. Die Breite der Streifen betrug ca. 670 m. Die gesamte beflogene Fläche ist 50 km<sup>2</sup> groß. Insgesamt wurden 219 Mio. Pulse mit einer Rate von 33 kHz aufgezeichnet. Aus diesen wurden 83 839 155 *first-pulse*-Punkte, 82 197 815 *last-pulse*-Punkte und 136 611 133 *only-pulse*-

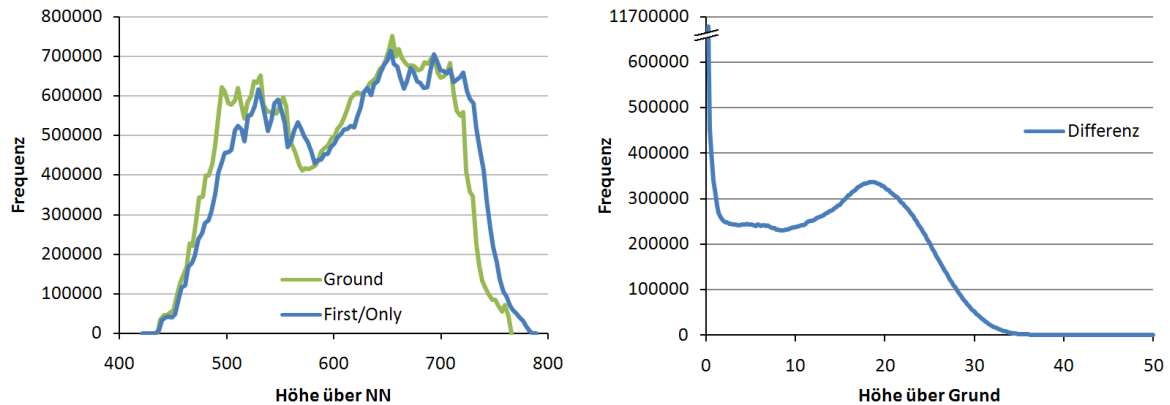


**Abbildung 9:** Verteilung der First/Only-Laserpunkte auf einem 20 m × 20 m großen Teilgebiet mit einem 1m-Raster

Punkte extrahiert. Aus den *last*- und *only*-pulse-Punkten wiederum wurden 64 031 886 *ground*-Punkte klassifiziert. Daraus ergibt sich eine durchschnittliche *first/only*-Punktdichte von ca. 4.4 pro m<sup>2</sup> und eine *ground*-Punktdichte von 1.3 pro m<sup>2</sup>.

Bei Annahme von Fußabdruckdurchmessern von 35 cm (Nadirsicht bei jedem Laserpuls, vgl. Abschnitt 3.2.2) ergibt sich eine Abdeckung des Bodens von ca. 42 %. Wäre jeder Puls im maximalen Winkel ausgesandt worden, ergäbe sich eine Abdeckung von 58 %. Die Scanlinien sind durch den verwendeten rotierenden vierseitigen Prismenspiegel parallel angeordnet. Die mittleren Punktabstände sind entlang der Abtastrichtung mit 0.54 m und quer zur Abtastrichtung mit 0.55 m nahezu identisch; es wurde also mit einer zur Scanrate angepassten Geschwindigkeit geflogen. Diese Werte wurden beispielhaft an einer flachen, unbewachsenen Fläche von 20 m × 20 m gemessen. Bei Flugzeugbewegungen (rollen, nicken oder gieren) und bei Objekten auf dem Untergrund kann nicht mehr von einer gleichmäßigen Verteilung der Punkte ausgegangen werden. Abbildung 9 zeigt die Punkteverteilung in einem Ausschnitt von 20 m × 20 m Größe. Im linken unteren Bereich, in dem es keine Bäume gibt, liegt eine relativ gleichmäßige Punktverteilung entlang der Scanlinien vor. Im rechten Bereich des dargestellten Ausschnitts dagegen stehen Bäume, so dass hier große Lücken und Klumpungen der Punkte zu beobachten sind, man spricht von einer halbzufälligen Verteilung der Punkte.

Die Häufigkeitsverteilung der Höhenwerte kann Abbildung 10 entnommen werden. Das linke Histogramm zeigt die Häufigkeit der Höhen über NN für DHM und DOM. Diese hängen in erster Linie von der Topographie des betrachteten Geländes ab. Deutlich ist die leichte Verschiebung der *First/Only*-Werte (DOM) gegenüber den *Ground*-Werten (DHM) nach rechts zu erkennen, die anzeigt, dass der größte Teil des Gebiets von Wald bedeckt ist. Im Wald wird der



**Abbildung 10:** Histogramme der gerasterten Laserscanner-Datensätze.

erste Teil des Laserpulses vor Erreichen des Bodens, also in größerer Höhe, reflektiert. Das rechte Histogramm zeigt die Häufigkeit der Werte des Differenzdatensatzes und damit eine ungefähre Häufigkeitsverteilung der Baumhöhen im Untersuchungsgebiet. Die höchsten Häufigkeitswerte gibt es für sehr geringe Höhen, diese stammen von Pixeln ohne Bäume. Die Graphik ist oben abgeschnitten; in der Bodenklasse mit Höhen um 0 m über Grund liegen 11.7 Millionen Pixel.

Der Einfluss unterschiedlicher Aufnahmebedingungen wie Aufnahmehöhen und Auslenkwinkel auf die Schätzung biophysikalischer Forstparameter wurde beispielsweise von NÆSSET (2004, 2009a) und MORS DORF et al. (2006, 2008) untersucht. Diese Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Aufnahmeparameter in der vorliegenden Befliegung für den beabsichtigten Zweck günstig gewählt waren. So waren beispielsweise in der Untersuchung von NÆSSET (2009a) bei 50 kHz Pulsfrequenz die Höhenschätzungen besser und die Anteile von Mehrfachechos höher als bei 100 kHz. Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Datensatz hat eine Pulsfrequenz von 33 kHz. Die Ergebnisse bei einer Flughöhe von 1100 m waren besser als die bei 2000 m über Grund. Auch hier liegt der bessere Wert näher an dem in der vorliegenden Arbeit verwendeten Wert von 700 m.

### 3.4 Vorverarbeitung der Lidar-Daten

Die Laserscannerdaten wurden als Ascii-Textdateien mit vier Spalten geliefert: Rechtswert

```

2579997.980 5517010.100 542.560 6.1
2579995.270 5517015.830 538.480 7.5
2579998.660 5517021.730 535.500 7.5
2579991.880 5517021.240 538.080 5.7
2579996.970 5517023.780 531.930 6.6
2579997.590 5517024.120 531.620 6.2
2579983.570 5517024.240 536.870 7.1
2579987.740 5517026.570 535.710 5.7
2579996.280 5517031.500 536.500 6.1

```

**Abbildung 11:** Format der Ascii-Dateien: Rechtswert, Hochwert, Höhe über NN und Intensitätswert.

und Hochwert im Gauß-Krüger-Koordinatensystem, Höhe über NN und Intensität (Abbildung 11). Die Daten waren klassifiziert in *first*, *last*, *only* und *ground*. Jede Klasse war bei der Lieferung in 21 einzelne Dateien eingeteilt (siehe Abbildung 13b).

Die Vorverarbeitung umfasst folgende Schritte, die in den nächsten Abschnitten kurz erläutert werden:

- Filtern der Bodenpunkte aus den Punktdaten
- Umsortieren der Punkte in Kacheln
- Rastern der Punktdaten mit räumlicher Interpolation
- Berechnung des nKM als Differenz von DOM und DHM
- Ausmaskieren fehlerhafter Randbereiche
- Berechnung weiterer Produkte, z.B. Hillshade-Bilder

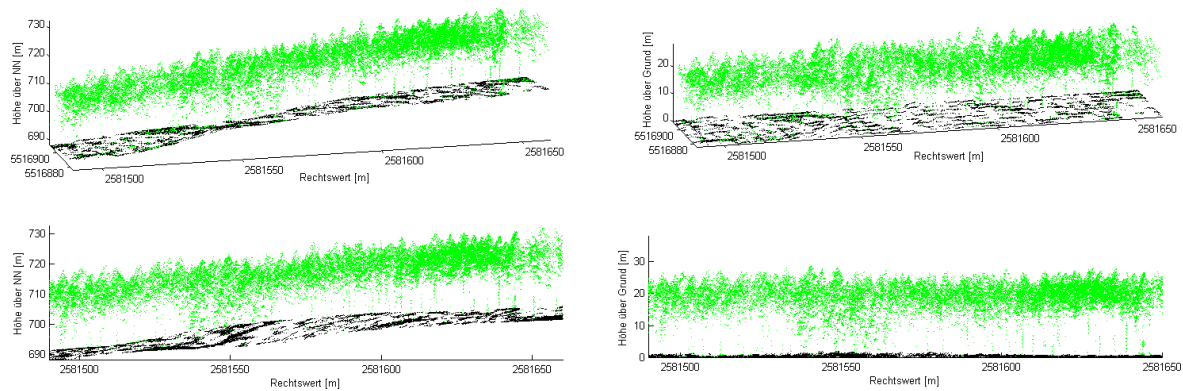
### 3.4.1 Filtern der Bodenpunkte

Der aufwendigste Schritt der Vorverarbeitung ist die Filterung der Bodenpunkte aus den *last*- und *only*-Punkten, für Waldgebiete auch als „*virtual deforestation*“ bezeichnet (HAUGERUD & HARDING 2001, vgl. Abbildung 17). Als „Filterung“ wird dabei die Entfernung unerwünschter Messungen aus der Gesamtheit der Daten bezeichnet (AXELSSON 1999). Da bei den verwendeten Datensätzen fertig gefilterte Bodenpunkte geliefert wurden, war dieser Schritt bereits erledigt.

Filtermethoden werden u.a. in CHEN et al. (2007), KOBLER et al. (2007), KRAUS (2004), PATENAUDE et al. (2004), KRAUS & PFEIFER (2001), HAUGERUD & HARDING (2001), HYYPPÄ et al. (2000), AXELSSON (1999) und KILIAN et al. (1996) beschrieben. KRAUS (2004) schlägt als robuste Schätzung vor, eine ausgleichende Fläche durch die Punkte zu legen. In einem zweiten Schritt wird den Punkten unter dieser Ausgleichsfläche ein hohes Gewicht zugewiesen, den Punkten über der Fläche ein geringes Gewicht. Eine aus den gewichteten Punkten berechnete neue Ausgleichsfläche liegt bereits näher an dem erwarteten Geländemodell. Nach wenigen Iterationen können die Punkte mit den höchsten Gewichten als Bodenpunkte klassifiziert werden. CHEN et al. (2007), PATENAUDE et al. (2004) und KILIAN et al. (1996) verwenden morphologische Filter (*opening*) mit variablen Fenstergrößen, um Bodenpunkte zu finden. LOHMANN & JACOBSEN (2004) führen eine Segmentierung mit Hilfe des Programms eCognition durch, um die Filterergebnisse zu verbessern. EVANS & HUDAK (2007) verwenden eine Krümmungsklassifikation nach HAUGERUD & HARDING (2001), die iterativ Nichtbodenpunkte, die positive Krümmungsschwellwerte überschreiten, ausschließt.

Bei der Filterung der Bodenpunkte ist darauf zu achten, dass möglichst alle Echos von Vegetationselementen und Gebäuden gelöscht werden, aber gleichzeitig genug Punkte erhalten bleiben, um auch kleine morphologische Strukturen abzubilden. Es kann zwischen *Commission Errors*, bei denen ein Punkt fälschlicherweise als Bodenpunkt klassifiziert wird (*false positive*), und *Omission Errors*, bei denen ein Bodenpunkt nicht als solcher erkannt wird (*false negative*), unterschieden werden. Einzelne *Omission Errors* sind weniger problematisch, da sie die Form der Geländeoberfläche kaum beeinflussen, während *Commission Errors* zu un-





**Abbildung 12:** Laser-Einzelpunkte, Schnitt von 160 m W-E- und 30 m N-S-Ausdehnung als 3D- (oben) und als 2D-Darstellung (unten). *First/Only*-Punkte sind grün dargestellt, *Ground*-Punkte schwarz. Links sind die Punkte mit Höhen über NN abgebildet, rechts ist jeweils die Bodenhöhe subtrahiert, so dass Höhen über Grund dargestellt sind.

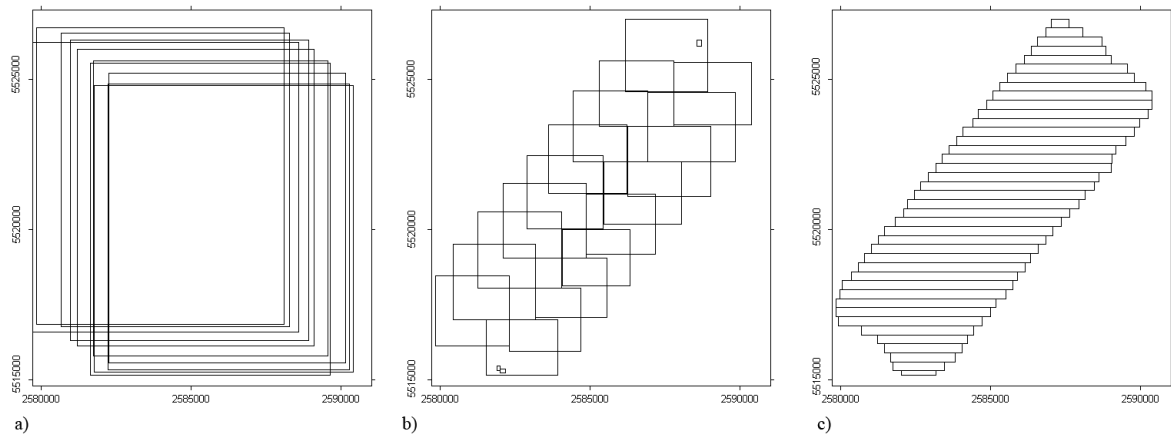
erwünschten Spitzen im Geländemodell führen, die keine Entsprechung im Gelände haben (EVANS & HUDAK 2007). Abbildung 12 zeigt für einen Ausschnitt des Datensatzes Idarwald die als Bodenpunkte erkannten Laserpulse in schwarz. Rechts ist die Normalisierung der Höhen durch den Bodendatensatz dargestellt. Hierfür wurde der interpolierte Bodendatensatz (vgl. Abschnitt 3.4.3) verwendet, da in der Einzelpunktswolke nicht zu jedem Punkt ein Bodenpunkt vorliegt (vgl. RIAÑO et al. 2003).

Die Qualität des Bodenpunktedatensatzes Idarwald kann als gut bezeichnet werden (siehe Abbildung 15b), während beim Datensatz Frankelbach die Gipfel einiger Hügel abgeschnitten wurden (vgl. KILIAN et al. 1996, HUISING & GOMES PEREIRA 1998), was aber manuell korrigiert werden konnte.

### 3.4.2 Kacheln der Punktdatensätze

Bevor mit den Daten in Bildverarbeitungsprogrammen weitergearbeitet werden konnte, waren einige weitere Vorverarbeitungsschritte notwendig. Zunächst wurden die Daten gekachelt, d.h. für jeden Datensatz wurden alle Punkte innerhalb eines im Gauß-Krüger-System rechteckigen Gebietes in eine Datei zusammengefasst. Um die Anzahl von Kachelgrenzen und den Programmieraufwand gering zu halten, wurden Streifen von 300 m (Morbach) bzw. 200 m (Otterbach) Nord-Süd-Ausdehnung über die volle West-Ost-Ausdehnung gewählt (siehe Abbildung 13c). An den Grenzen der einzelnen Kacheln wurden Überlappungsbereiche von 10 m Breite definiert, so dass beim späteren Zusammenfügen keine scharfen Grenzen entstehen.

Aus den vier Punktdatensätzen (*first*, *last*, *only* und *ground*) wurden zwei gekachelte Datensätze erzeugt. Der *first*- und der *only*-Datensatz wurden zusammengefasst, um gemeinsam das Oberflächenmodell bilden. Außerdem wurde der *ground*-Datensatz, der aus gefilterten *last*- und *only*-Punkten besteht, gekachelt. Aus den *last*-Punkten alleine wurden keine weiteren Datenprodukte erzeugt.



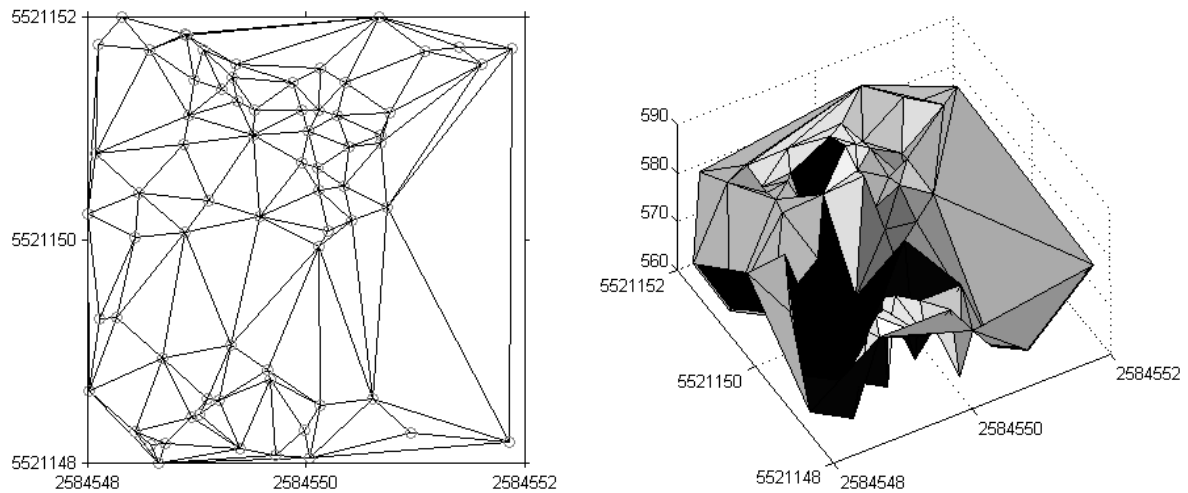
**Abbildung 13:** Bounding Boxes a) der Flugstreifen, b) der gelieferten Punktdaten, c) der gekachelten Punktdaten

Sinn des Kachelns ist, dass zwischen den Kacheln im verwendeten Koordinatensystem nur horizontale und vertikale Schnittgrenzen auftreten sollen, um das Zusammenfügen der interpolierten Daten zu einem Mosaik zu vereinfachen (CHEN 2007). Ein weiterer Grund für das Kacheln der Daten liegt darin, Dateien zu erzeugen, die klein genug sind, um sie im nächsten Schritt interpolieren zu können. Mit IDL/Envi, dem zur räumlichen Interpolation der Daten (siehe nächster Abschnitt) verwendeten Programm, können bei der verwendeten Computerkonfiguration (Windows XP 32 Bit, 2 GB RAM) maximal ca. 200 MB große Punktdatensätze verarbeitet werden; aus dieser Beschränkung ergibt sich die gewählte Streifenbreite. Außerdem enthalten die nach den Achsen des Koordinatensystems ausgerichteten Kacheln ein Minimum an leeren Flächen ohne Punkte, so dass die interpolierten Streifen deutlich speichereffizienter sind als Kacheln, die sich an den ursprünglichen Flugstreifen orientieren (Abbildung 13a und c). Die Umsetzung der Kachelung erfolgte mit Hilfe der Programmiersprache Matlab. Für das Umsortieren der Daten in geeignete Kacheln ist für einen kompletten Datensatz eine Rechenzeit von einigen Stunden einzukalkulieren.

### 3.4.3 Rastern der Punktdaten

Nachdem die Punktdaten als gekachelte Dateien vorliegen, können sie gerastert werden. Für viele Anwendungen ist es notwendig, dass die Daten in Form eines regelmäßigen Rasters, also eines aus Pixeln aufgebauten Bildes, vorliegen (LLOYD & ATKINSON 2006, MAGNUSSEN et al. 2007).

LLOYD & ATKINSON (2002), ANDERSON et al. (2005) und MAGNUSSEN et al. (2007) sowie die Diplomarbeit von SCHEEL (2007) konnten zeigen, dass aufwendige Interpolationsmethoden wie Spline-Interpolation oder Kriging nur bei der räumlichen Interpolation von Daten mit geringer Punktdichte im Verhältnis zur gewünschten Rasterweite (Pixelgröße) zu besseren Ergebnissen führen als einfache Verfahren wie Nearest-Neighbour-Zuweisung, Inverse-Distance-gewichtete Interpolation oder Interpolation mit Hilfe von TINs (*Triangulated Irregular Networks*).



**Abbildung 14:** Links: Delaunay-Triangulation. Rechts: Lineare Interpolation der Dreiecksflächen.

In den meisten Gebieten liegt die Punktdichte bei ca. 4 Punkten pro Quadratmeter. Als Rasterweite wurde für die meisten Anwendungen ein Quadratmeter gewählt. Daraus ergibt sich, dass die meisten Pixelwerte als Mittelwert mehrerer Messwerte berechnet werden und nicht als interpolierte Werte zwischen entfernt liegenden Messwerten.

Das Rastern der Punktdaten wurde in der Programmiersprache IDL (Interactive Data Language) als Interpolation mit Hilfe von TINs durchgeführt. In IDL werden dafür die beiden Befehle `TRIANGULATE` und `TRIGRID` verwendet. `TRIANGULATE` erzeugt eine Delaunay-Triangulation zwischen den Punkten (ITT 2007). Dabei werden benachbarte Punkte so miteinander zu Dreiecken verbunden, dass im Umkreis jedes Dreiecks kein weiterer Punkt liegt (WEBSTER & OLIVER 2007). Abbildung 14 zeigt die Triangulation und eine dreidimensionale Darstellung der linear interpolierten Höhenwerte für einen kleinen Ausschnitt des First/Only-Datensatzes. Die IDL-Funktion `TRIGRID` gibt für die gegebenen Punkte und das Triangulationsnetz ein regelmäßiges Raster interpolierter Höhenwerte aus. Bei der IDL-Funktion kann zwischen linearer Interpolation und mit einem Polynom fünfter Ordnung geglätteter Spline-Interpolation gewählt werden. Außerdem ist es möglich, Werte außerhalb der Meßpunkte zu extrapolieren (ITT 2007). In der vorliegenden Arbeit wurde immer linear interpoliert, ohne Extrapolation über dem gescannten Bereich hinaus. Das vollständige IDL-Programm, das für jede Kachel ein Rasterbild erzeugt, dieses abspeichert und zusätzlich eine Envi-Headerdatei schreibt, steht in Anhang C.1. Das Programm erzeugt Kacheln mit ganzzahligen, bzw. durch die Rasterweite teilbaren, Eckkoordinaten, wodurch garantiert wird, dass die Kacheln nahtlos aneinanderpassen.

Die Rasterung wurde jeweils für die Höhen- und Intensitätswerte des First/Only- und des Ground-Datensatzes durchgeführt. Als Rasterweite wurde für die meisten Anwendungen 1 m gewählt, es wurden aber auch Bilder mit 0.5 m, 2 m und 5 m Rasterweite erzeugt.

### 3.4.4 Zusammenfügen der Kacheln

Nach der Berechnung der gerasterten Kacheln konnten die einzelnen Datensätze zu Mosaiken zusammengesetzt werden (Abbildung 13c). Dies wurde mit Hilfe der *Mosaic*-Funktion des Programms Envi durchgeführt. Da im vorherigen Schritt die Raster zueinander passend erstellt wurden, entstand ein nahezu nahtloses Mosaik. Wenn bei der Interpolation nicht darauf geachtet wird, zueinander passende Raster zu erzeugen (beispielsweise indem nicht-ganzzahlige Eckkoordinaten zugelassen werden), müssen Werte resampled werden und es können störende Kanten an den Schnittstellen entstehen. Die *Mosaic*-Funktion bietet die Option, durch *Feathering* Kanten unsichtbar zu machen. Dabei wird ein definiert, in dem benachbarte Kacheln ineinander überblendet werden, wenn sie Überschneidungen aufweisen (ITT 2009). Weil im vorherigen Schritt zu den Kacheln auch Envi-Headerdateien mit den benötigten Geoinformationen gespeichert wurden, konnten die Kacheln ohne Eingabe weiterer Parameter korrekt zusammengesetzt werden.

### 3.4.5 Berechnung des Kronenmodells

Aus den auf die beschriebene Weise erzeugten Boden- und Oberflächenmodellen kann nun das normalisierte Kronenmodell (nKM) durch Subtraktion errechnet werden. Da die beiden Ausgangsdatsätze nicht exakt die gleiche räumliche Ausdehnung haben, kann es am Rand zu extremen Ausreißern kommen. Daher empfiehlt es sich, die Ränder an den Stellen auszumaskieren, an denen sie unrealistische Werte annehmen. Laut KRAUS & RIEGER (1999) können Ausreißer nach oben auch von Vögeln, die durch den Laserstrahl fliegen, verursacht werden. Im vorliegenden Datensatz gibt es sehr wenige Ausreißer; diese konnten problemlos eliminiert werden. Das Kronenmodell des Datensatzes Idarwald ist in Abbildung 16a dargestellt.

### 3.4.6 Datenprodukte

Nach der Vorverarbeitung liegen die folgenden Produkte vor:

- ASCII-Punktdatei, gekachelt und aufgeteilt in First/Only- und Ground-Datensatz
- Gerasterte Bilder:
  - DOM (First/Only-Raster, Abbildung 15a)
  - DHM und DHM-Hillshade (Abbildung 15b)
  - Differenzbild (normalisiertes Kronenmodell, Abbildung 16a)
  - Intensitätsbilder (Abbildung 16b)

Aus diesen Datensätzen werden die weiterführenden Produkte berechnet.

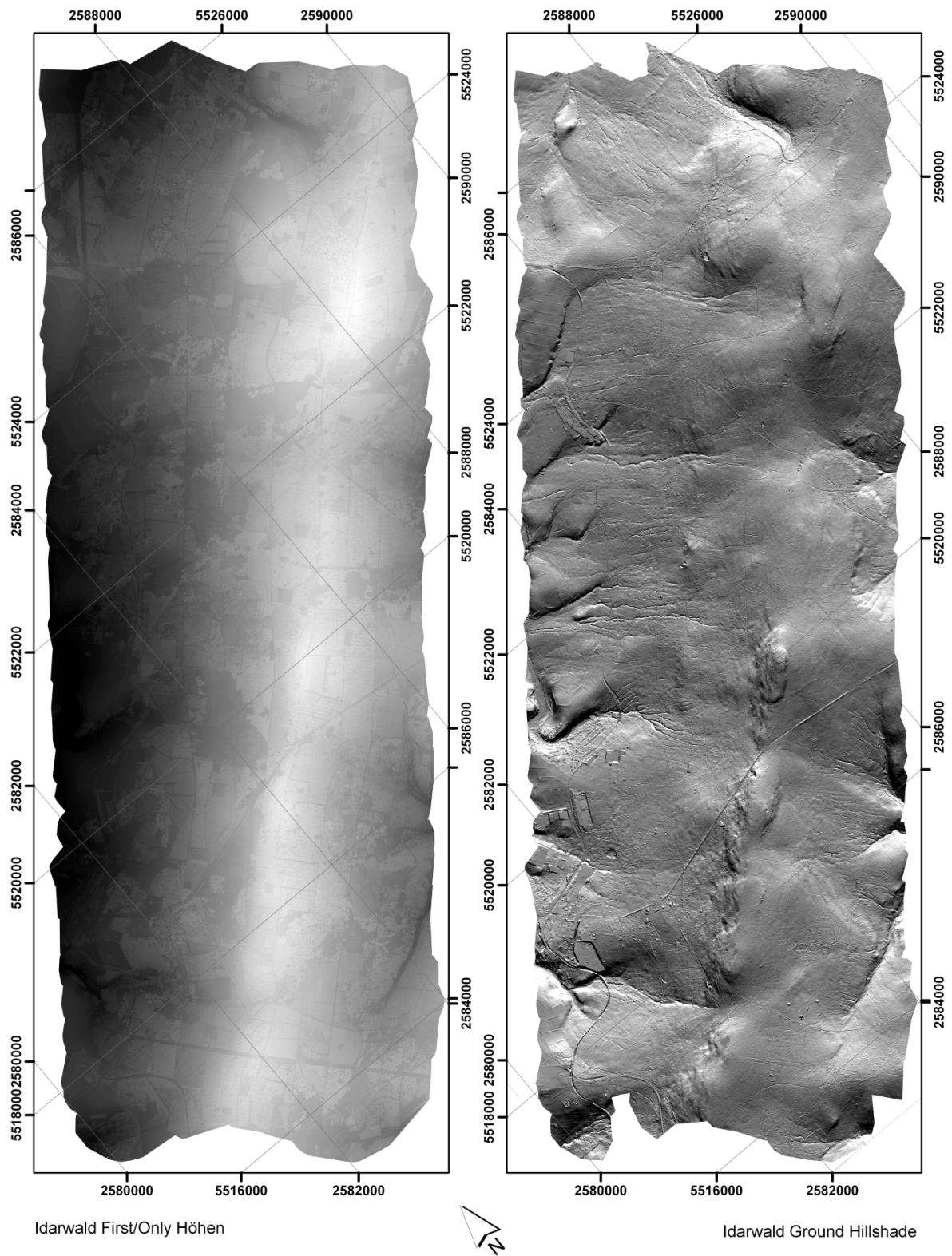
Im Digitalen Oberflächenmodell (DOM, Abbildung 15a) sind sowohl die Geländehöhen als auch die Objekte auf dem Gelände abgebildet. Besser geeignet zur Beurteilung des Geländes ist das DHM, geeignet zur Untersuchung der Objekte ist das Differenzmodell.

Das DHM-Hillshade-Bild (Abbildung 15b) wurde in Envi aus dem DHM berechnet. Dafür wurde eine virtuelle Beleuchtungsquelle bei 45° Höhenwinkel und 45° Azimutwinkel (also aus

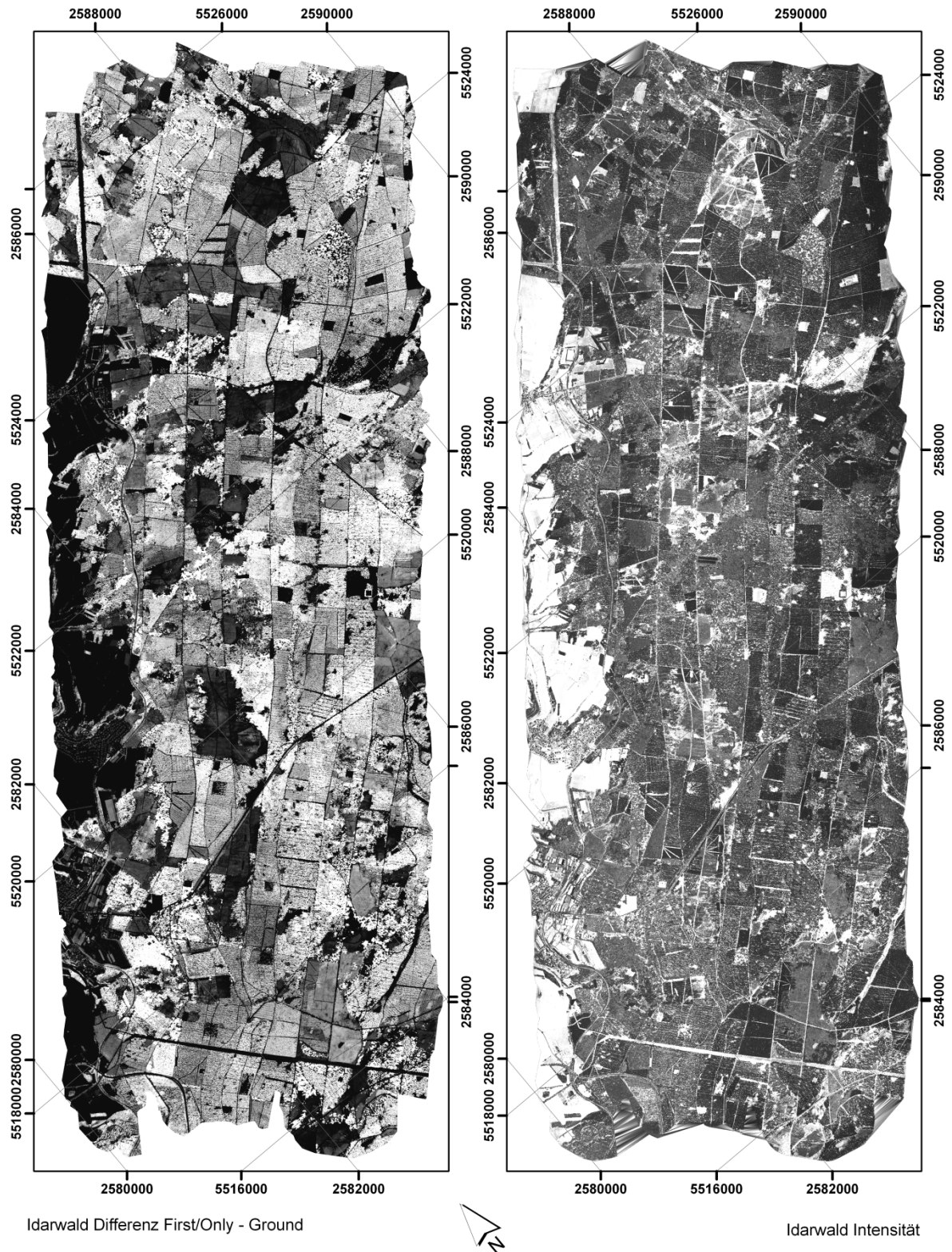
Nordost) platziert. In einem Hillshade-Bild lassen sich sehr gut relativ geringe Höhenunterschiede erkennen. Im vorliegenden Beispiel werden kleinste Abflussrinnen und Krater sichtbar, die normalerweise unter Wald verborgen sind. Abbildung 17 illustriert dies für einen vergrößerten Ausschnitt. Es konnten trotz Belaubung genügend Laserpulse bis zum Boden durchdringen, um noch ein detailliertes Modell des Geländes zu zeichnen. Es ist im Hillshade-Bild allerdings auch zu erkennen, dass unter besonders dichtem Wald nur noch wenige Pulse den Boden erreichen; zwei solcher Bereiche sind durch rote Ellipsen markiert. In diesen Bereichen sind die dreieckigen Flächen aus der Triangulation zu erkennen. SITTLER (2004) konnte anhand eines mit Laserscanning in bewaldetem Gebiet erzeugten Hillshade-Bildes nahe Rastatt fossile Ackerfurchen ausmachen. JAMES et al. (2007) verwendeten ähnliche Methoden, um Gullies und kleine Bachbetten unter Wald zu kartieren.

Das Differenzmodell (Abbildung 16a) enthält die Höhen von Laserechos aus Baumkronen und Gebäuden in Metern über Grund. Aus dem Differenzmodell können Karten der Baumhöhe erstellt werden (siehe Abschnitt 4.1.5).

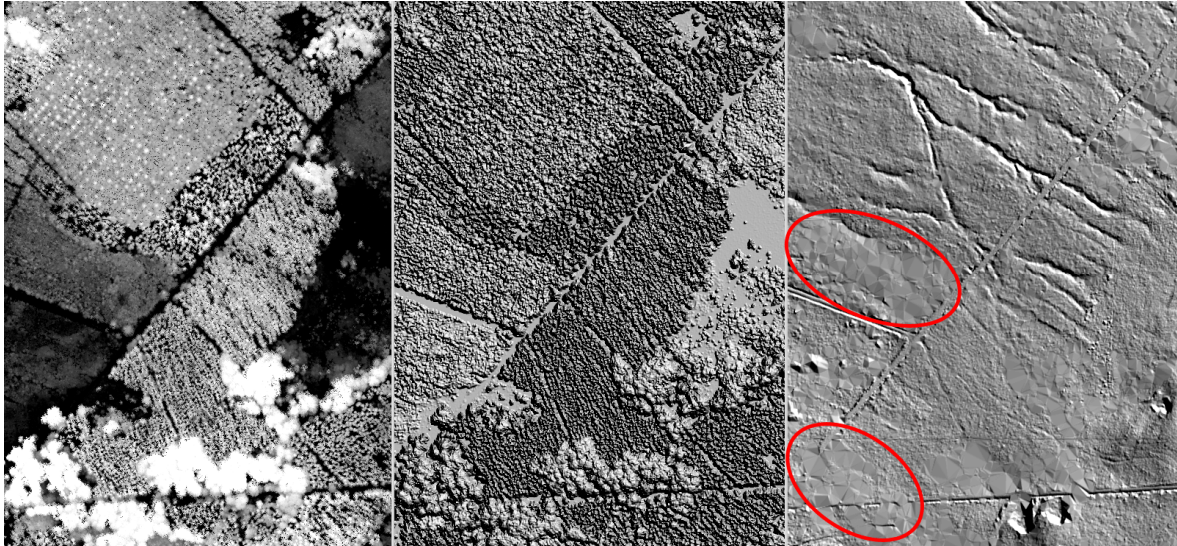
Intensitätsbilder der Oberflächenpunkte (Abbildung 16b) sind mit Luftbildern vergleichbar, enthalten allerdings wegen der aktiven Aufnahmetechnik keine Schatten. In Abschnitt 4.9 wird eine Klassifikation zwischen Laub- und Nadelwald sowie Nichtwaldgebieten mit Hilfe der Intensität vorgestellt.



**Abbildung 15:** Karte der Laserscanning-Datensätze Idarwald 2005. Links: First/Only-Datensatz (DOM), helle Grautöne entsprechen großen Höhen. Rechts: Ground-Datensatz (DHM) in Hillshade-Darstellung mit Beleuchtung von oben. Beide Datensätze sind um 40° gegen den Uhrzeigersinn rotiert.



**Abbildung 16:** Karte der Laserscanning-Datensätze Idarwald 2005 Teil 2. Links: Differenz aus First/Only- und Ground-Datensatz, also normalisiertes Kronenmodell (nKM). Rechts: Intensität der First/Only-Punkte. Beide Karten sind um 40° gegen den Uhrzeigersinn gedreht.



**Abbildung 17:** Virtuelle Entwaldung: Links ein Ausschnitt des nKM, wobei helle Töne großen Baumhöhen entsprechen. In der Mitte ein Hillshade-Bild dieses Ausschnitts. Rechts ein Hillshade-Bild des DHM im gleichen Ausschnitt: Die durch den Wald verdeckten Strukturen werden sichtbar. Markiert sind Bereiche mit geringen Punktdichten.

### 3.4.7 Qualitätskontrolle der Lidar-Daten

Die Qualität von Laserscanningdaten wird von einer Vielzahl von Faktoren beeinflusst, die sich einteilen lassen in Fehler, die durch das Lasersystem (Laser, GPS, INS und deren Synchronisation) verursacht werden, Fehler, die durch die Datencharakteristik (Punktdichte, Flughöhe, Scanwinkel) verursacht werden, Fehler, die während der Datenprozessierung entstehen (Interpolationsfehler, Filterfehler, Fehler durch Segmentierung oder Glättung der Daten) und Fehler durch die Charakteristik des Objekts am Boden (Geländetyp, Geländeneigung, Vegetationsdichte, Totalreflexion; HUISING & GOMES PEREIRA 1998, AHOKAS et al. 2005).

Die Daten wurden vom Hersteller vorkorrigiert, so dass wenige deutliche Fehler zu erkennen waren. Durch den Blockausgleich zwischen den Streifen ist den Daten nicht anzusehen, dass sie aus mehreren Flugstreifen zusammengesetzt sind und dass die Punkte unter deutlich unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen wurden. Zur Verbesserung der absoluten Höhengenaugigkeit wurden im Gelände einige Punkte, die im Datensatz wiedergefunden werden sollten, mit einem Theodolit von Höhenfestpunkten des Landesamts für Geobasisinformation und Vermessung aus eingemessen. Die Höhengenaugigkeit wurde vom Hersteller mit  $\pm 10$  cm angegeben, die Lagegenauigkeit mit  $\pm 15$  cm.

Es gab insgesamt 11 Ausreißerpunkte, deren Höhe über NN mit über 1000 m angegeben war, gegenüber weniger als 800 m Höhe für alle anderen Punkte. Diese Ausreißer konnten problemlos entfernt werden.

STREUTKER & GLENN (2006) schlagen als einfache Methode zur Analyse der Höhenfehler in Lidar-Daten vor, die Streuung von Laserechos glatter Oberflächen zu analysieren. Als Testflächen ungeeignet sind Wasserflächen, da diese größtenteils spiegelnd reflektieren und so der reflektierte Laserstrahl nicht vom Sensor empfangen wird. Daher ist die Dichte von reflektier-



ten und dann vom Sensor detektierten Punkten auf Wasserflächen sehr gering. Ebenfalls sehr flach und großflächig sind Sportplätze. Im Datensatz Idarwald liegen keine Sportplätze, aber im Datensatz Frankelbach, der am gleichen Tag mit der gleichen Instrumentierung aufgenommen wurde.

Tabelle 3 gibt die Standardabweichungen der Lidar-Daten in den Sportplatzflächen an. Im gerasterten Datensatz sind durch die Interpolation lokale Extremwerte herausgerechnet, deshalb weist dieser deutlich geringere Streuungen als der Einzelpunktensatz. Wegen der kleinen Streuung der Höhenwerte, die im Bereich der Länge der Grashalme liegt, kann die Qualität der Daten als sehr hoch angesehen werden.

**Tabelle 3:** Standardabweichungen der Lidar-Daten auf Sportplätzen

Sportplatz	StAbw Raster	StAbw Einzelpunkt
Weilerbach	0.0182 m	0.0745 m
Erzenhausen	0.0128 m	0.0909 m
Katzweiler	0.0156 m	0.0678 m
Kaulbach	0.0150 m	0.0403 m

### 3.5 Full-Waveform-Lidar

Der bei den Befliegungen der Untersuchungsgebiete Idarwald und Otterbach verwendete Laserscanner des Typs Riegl LiteMapper 5600 ist als einer der ersten kommerziellen Small-Footprint-Laserscanner in der Lage, die vollständige Wellenform der reflektierten Laserpulse aufzuzeichnen. Diese Full-Waveform-Daten enthalten für jeden Laserpuls die zeitlich aufgelösten Intensitäten des ausgesandten Strahls und des Echos eines jeden getroffenen Ziels. Wenn also im Weg des Laserstrahls mehrere Ziele getroffen werden, wird nicht nur die Laufzeit zum ersten und letzten Ziel aufgenommen, sondern auch die der Objekte dazwischen (RIEGER et al. 2006, HUG et al. 2005). Die Welle kann eine komplexe Form annehmen und enthält nicht nur Laufzeit (und damit die dreidimensionale Position), sondern auch die Intensität und Breite der einzelnen Reflexionen (BRETAR et al. 2009).

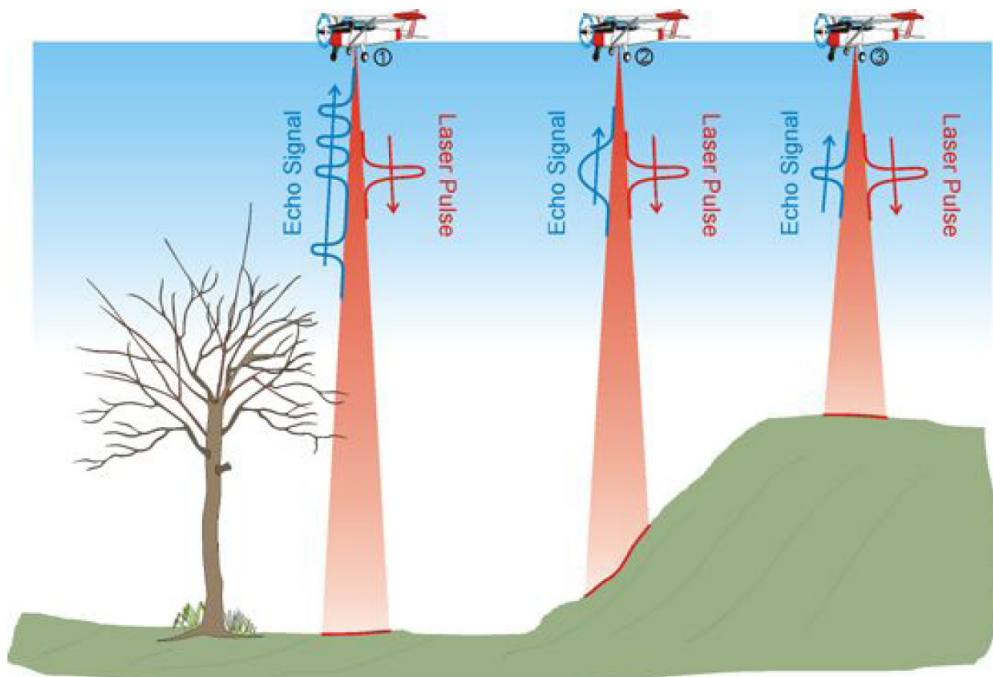
Die ersten Einsätze von Wellenform-Lidar gab es bereits in den 1990er Jahren. Die Sensoren SLICER (*Scanning Lidar Imager of Canopies by Echo Recovery*, BLAIR et al. 1994, MEANS et al. 1999, LEFSKY et al. 1999b) und LVIS (*Laser Vegetation Imaging Sensor*, BLAIR et al. 1999a, 1999b) waren die ersten flugzeuggestützten Large-Footprint-Laserscanner mit Durchmesser der Footprints von ca. 10 und 25 m. Inzwischen gibt es auch Small-Footprint-Systeme von mehreren Herstellern. Einen Überblick über aktuelle experimentelle und kommerzielle wellenformaufzeichnende Lidar-Systeme geben MALLET & BRETAR (2009).

Mit Full-Waveform-Lidar-Daten kann die strukturelle Komplexität und die damit verbundenen funktionellen Eigenschaften natürlicher Landschaften erfaßt werden, indem die resultierenden vertikalen und volumetrischen Profile von Forstbeständen analysiert werden (LEFSKY et al. 1999a). Die Daten haben sich zur Schätzung vielfältiger ökologischer Variablen wie Bestandshöhe und -struktur, vertikaler Verteilung der Bestandselemente, Bedeckungsgrad, Bi-

omasse und Lichtdurchlässigkeit als nützlich erwiesen (BLAIR & HOFTON 1999, LEFSKY et al. 1999a, MEANS et al. 1999, PARKER et al. 1999, DRAKE et al. 2002, HYDE et al. 2005, ANDERSON et al. 2006). Dabei wurden allerdings meist Large-Footprint-Laserscanner verwendet, die eine sehr viel geringere Punktdichte und Detailauflösung bieten als der in der vorliegenden Arbeit verwendete Small-Footprint-Laserscanner. Untersuchungen mit Small-Footprint-Laserscannern sind noch selten (z. B. PERSSON et al. 2005, KOETZ et al. 2006, DUCIC et al. 2006, WAGNER et al. 2006, REITBERGER et al. 2008).

Beim in der vorliegenden Arbeit verwendeten Laserscanner ist die Länge der Wellenform prinzipiell unbeschränkt; die Aufzeichnung endet jeweils, wenn das empfangene Signal eine Rauschschwelle unterschreitet. Die Aufzeichnung erfolgt mit einem sehr großen optischen Dynamikumfang von 495 dB. Da außerdem die ausgesandte Wellenform aufgezeichnet wird, ist eine präzise Dekomposition der empfangenen Welle möglich (REITBERGER et al. 2008). Andere Waveform-fähige Systeme bieten dies meist nicht, so kann beispielsweise der Scanner TopEye MK II Wellenformen nur mit einer maximalen Länge von 19 m messen, digitalisiert sie mit einer Auflösung von 8 Bit und zeichnet den ausgesandten Puls nicht auf.

Abbildung 18 illustriert die Aufzeichnung von Full-Waveform-Laserscannerdaten. Wenn der Laserstrahl vor Erreichen des Bodens bereits zum Teil reflektiert wird, also auf Hindernisse trifft, deren vom Laserstrahl getroffene projizierte Fläche kleiner als der Fußabdruck des Strahls ist, werden mehrere Echos aufgezeichnet. Die einzelnen Echos können getrennt werden, wenn die reflektierenden Objekte mehr als die halbe Breite des ausgesandten Signal auseinanderliegen (HUG et al. 2005, WAGNER et al. 2006). Ein Echosignal, das breiter als das ausgesandte Signal ist, kann auf mehrere Hindernisse hindeuten, die nicht weit genug ausei-



**Abbildung 18:** Aufzeichnung von Full-Waveform-Daten. Liegen kleine Hindernisse im Weg des Strahls, werden mehrere Echos aufgezeichnet. Geeignete reflektierende Flächen führen zu einer Aufweitung des Echosignals gegenüber der Reflexion von ebenen Flächen (Quelle: HUG et al. 2005).

inander liegen. Auch gegenüber der Beleuchtungsrichtung geneigte Flächen erzeugen ein verbreitertes Echosignal, allerdings ist dieser Effekt bei dem verwendeten Scanner mit ca. 4 ns Pulslänge zu klein, um zuverlässig detektiert zu werden (HUG et al. 2005). Der einfachste Fall ist in Abbildung 18 rechts abgebildet: Trifft der Strahl senkrecht auf ebenen Untergrund, wird nur ein Echo zurückgeworfen. Die Wellenform dieses Echos entspricht, bei verminderter Intensität, dem Startpuls.

Die vorliegenden Full-Waveform-Daten wurden, im Gegensatz zu den Einzelpunktdateien, keinem Blockausgleich unterzogen, so dass die einzelnen Flugstreifen in ihrer Höhe nicht perfekt aneinanderpassen. Die ersten drei Streifen liegen ca. 0.5 m unter den restlichen sieben.

### 3.5.1 Datenformat der Full-Waveform-Lidar-Daten

Die Full-Waveform-Daten wurden vom Auftragnehmer der Befliegung Idarwald in zwei Binärdateien geliefert. Die erste Datei (Endung `.lgc`) enthält zu jedem Laserpuls Metainformationen, in der zweiten Datei (Endung `.lwf`) sind die eigentlichen Full-Waveform-LiDAR-Daten gespeichert. Die einzelnen Variablen der Metadaten sind in Tabelle 4 aufgeführt und in Abbildung 19 graphisch dargestellt. Ein Metadatensatz beansprucht 56 Byte Speicherplatz; aus der Dateigröße der LGC-Dateien lässt sich so die Anzahl der Laserpulse pro Datei errechnen. Der Idarwald-Datensatz ist in 10 Flugstreifen mit jeweils ca. 15 bis 25 Millionen Laserpulsen aufgeteilt; insgesamt wurden 199 043 955 Pulse aufgenommen. Die Binärdaten belegen ca. 35 GB Festplattenplatz.

**Tabelle 4:** Datenformat der Full-Waveform-LiDAR-Daten

Variablenname	Datentyp	Beschreibung
WFI	64-Bit-Integer	Offset des Datensatzes in der LWF-Datei, in Bytes ab Dateianfang
T	Double Precision	GPS-Zeitstempel des Laserpulses
EO	Double Precision	Rechtswert des Startpulses
NO	Double Precision	Hochwert des Startpulses
HO	Floating Point	Höhe über NN des Startpulses
dE	Floating Point	Ostkomponente des Richtungsvektors
dN	Floating Point	Nordkomponente des Richtungsvektors
dH	Floating Point	Höhenkomponente des Richtungsvektors (negative Werte in Richtung Boden)
WFOFFSET	16-Bit-Integer	Offset des ersten Bodenechos
WFLEN	16-Bit-Integer	Anzahl der Samples des Bodenechos
STRTWFLLEN	16-Bit-Integer	Anzahl der Samples des Startpulses
SAMPDEPTH	Byte	0 bei 1 Byte Sampletiefe, 1 bei 2 Byte Sampletiefe
RES	Byte	Reserviert (immer 0)

Die räumlichen Koordinaten des Sensors zum Zeitpunkt der Abstrahlung des Laserpulses sind in den Variablen  $E_0$ ,  $N_0$  und  $H_0$  hinterlegt. Die Richtung, in die der Puls abgestrahlt wird, steht im Vektor  $(dE, dN, dH)$ . Die Vektorkomponenten werden in Metern gespeichert, so dass der Betrag des Vektors  $(\sqrt{dE^2 + dN^2 + dH^2})$  genau die in Gleichung (3-1) errechneten 14.985 cm ergibt, die das Licht in einer halben Nanosekunde zurücklegt. Mit Hilfe des Offsets des ersten Laserechos,  $WFOFFSET$ , das in *Bins*, also der Anzahl der durch die drei Komponenten spezifizierten Vektoren, gemessen wird, lässt sich die dreidimensionale Position von jedem Teil  $i$  des Echos berechnen (GEOLAS CONSULTING o. J.):

$$\begin{aligned} E_i &= E_0 + dE \cdot (WFOFFSET + i) \\ N_i &= N_0 + dN \cdot (WFOFFSET + i) \\ H_i &= H_0 + dH \cdot (WFOFFSET + i) \end{aligned} \tag{3-12}$$

Die eigentlichen Wellenform-Daten in der LWF-Datei sind eingeteilt in die Startwelle und die Echowelle. Die Daten einer bestimmten Welle können gefunden werden, indem der Lesezeiger ab Anfang der Datei um  $WFI$  Bytes sequentiell vorwärtsbewegt wird. Die Startwelle, also die vom Laserscanner ausgesandte Wellenform, ist in einem Byte-Array von  $STRTWFLEN$  Samples abgelegt, die Echowelle in einem Array mit der Länge  $WFLEN$ . Wenn hier der Intensitätswert 255 überschritten wird, ist die Echowelle als 2-Byte-Integer gespeichert, ansonsten als Byte ( $SAMPDEPTH$ ). Eine Matlab-Funktion, mit der die Wellenform eines Laserpulses anhand der Flugstreifennummer und der laufenden Nummer des Pulses im Streifen eingelesen werden kann, ist in Anhang C.2 dargestellt.

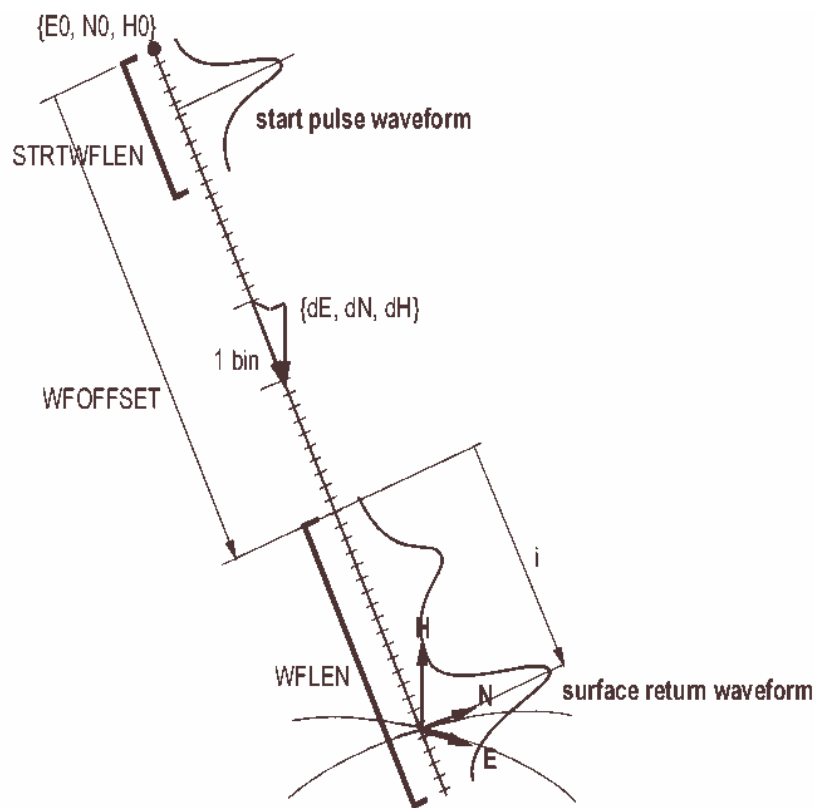


Abbildung 19: Variablen der Full-Waveform-LiDAR-Daten. Quelle: Geolas Consulting (o. J.)

Die Pulse sind in der zeitlichen Reihenfolge ihrer Aufnahme gespeichert, daher ist es aufwendig, Pulse nach dem Ort anstatt nach der laufenden Nummer zu suchen. Um die Wellenformen an gegebenen Koordinaten schnell zu finden, wurden alle Metadatensätze eingelesen, die Bodenpositionen berechnet und als Matlab-Datei abgespeichert. Des Weiteren wurde für jede  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  große Teilfläche des Untersuchungsgebiets gespeichert, welche Flugstreifen diese Fläche abdecken. Damit können beispielsweise alle Wellenformen in einer rechteckigen Umgebung innerhalb weniger Sekunden in der großen Datenmenge gefunden und eingelesen werden, wodurch die Darstellungen im nächsten Abschnitt möglich wurden.

### 3.5.2 Visualisierungen der Full-Waveform-Lidar-Daten

Wellenform-Lidar erlaubt detaillierte Einblicke in die Struktur des abgebildeten Bestands, wenn die Daten geeignet dargestellt werden (PERSSON et al. 2005). Dieser und der folgende Abschnitt sollen einige Formen der Visualisierung von Wellenform-Lidar darstellen, die jeweils den Strahlungstransfer der Laserstrahlen in Forstbeständen illustrieren.

Abbildung 20 zeigt für den ersten Laserpuls des ersten Streifens die ausgesandte Wellenform (Startwelle) und die empfangene Wellenform (Echowelle). Bei der Echowelle sind auf der Ordinate die zu den einzelnen Intensitätswerten gehörenden Höhen nach Gleichung (3-12) aufgetragen, bei der Startwelle die Zeit ab Beginn der Aufzeichnung. Die Intensitäten sind jeweils in Geräteeinheiten dargestellt. Die Startwelle hat ungefähr die Form einer Normalverteilungskurve, also eines gaußschen Impulses. Das empfangene Echo ist eine Kombination von gaußschen Impulsen unterschiedlicher Amplitude und Rauschanteilen.

Abbildung 21 zeigt alle Laserstrahlen, die auf einer Bodenfläche von  $4\text{ m} \times 4\text{ m}$  konvergieren in einer dreidimensionalen Darstellung. Dabei sind im linken Teil der Abbildung die Intensitätswerte zu den Rechtswerten addiert. Deutlich ist zu erkennen, dass die betrachtete Fläche von Wellen aus zwei unterschiedlichen Richtungen, also von zwei unterschiedlichen Flugstreifen, bestrahlt wird. Die in der Abbildung von rechts kommenden Strahlen werden größtenteils im oberen Teil einer Baumkrone in ca.  $18\text{ m}$  Höhe über Grund reflektiert, während

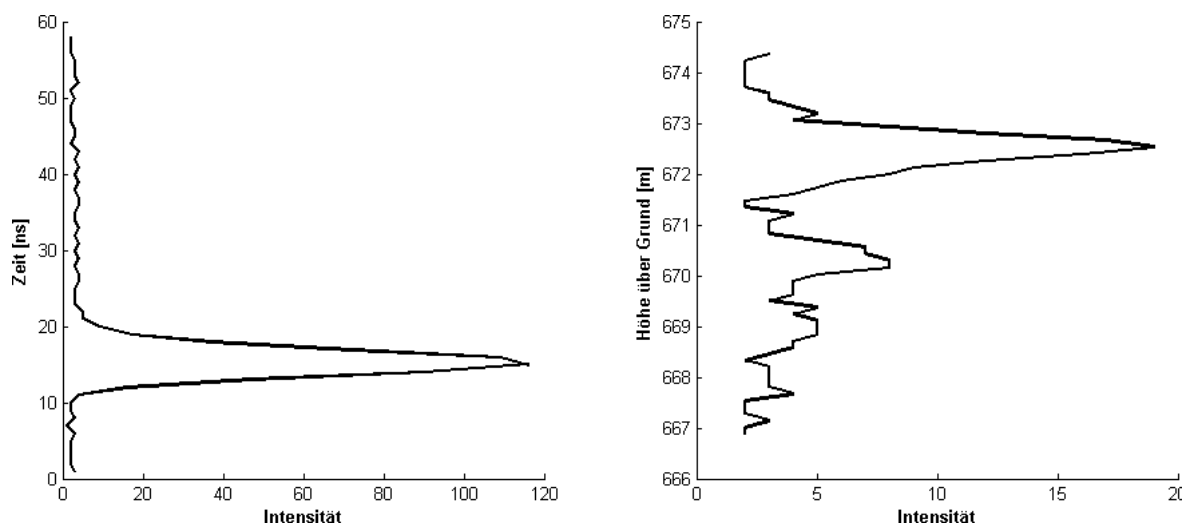
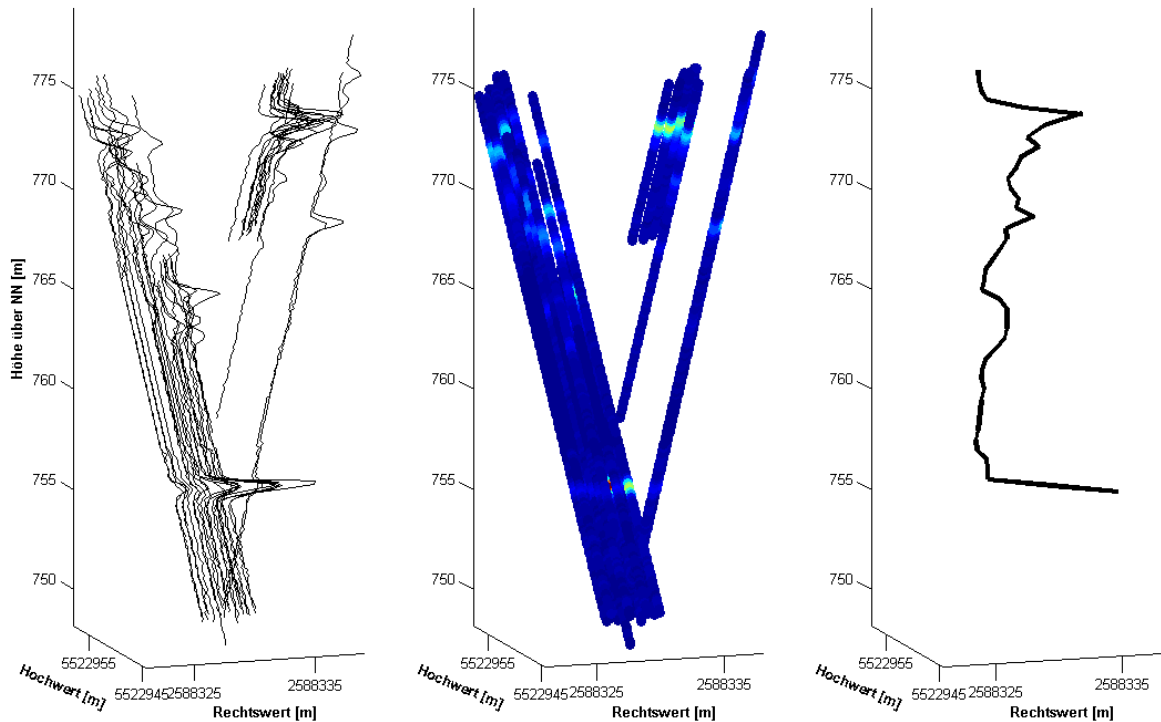


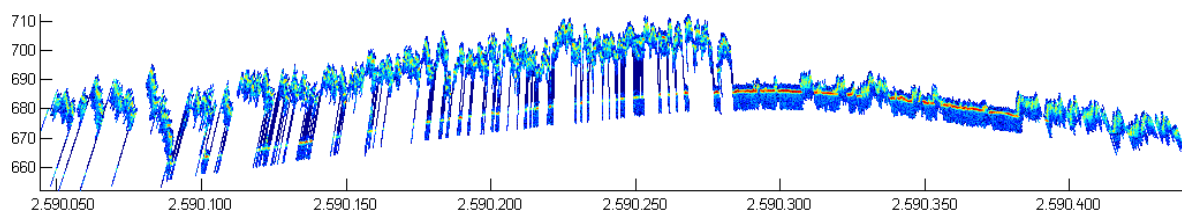
Abbildung 20: Start- und Echowellenform des ersten Laserpulses.

die Strahlen von links einen fast freien Weg zum Boden haben und ihre stärksten Ausschläge erst am Boden zeigen. Im mittleren Teil der Abbildung werden die Intensitäten in Farbwerten dargestellt, wobei blau niedrigen Intensitäten entspricht und grün, gelb und rot höhere Intensitäten anzeigen. Die rechte Teilabbildung zeigt die auf Höhenschritte von 0.5 m interpolierten mittleren Intensitäten.

Abbildung 22 ist eine Darstellung aller 1060 Wellenformen in einem Scanstreifen. Die Intensitäten sind farbcodiert, wobei Rottöne der höchsten Intensität entsprechen und dunkelblaue Töne der geringsten. Die stärksten Ausschläge (Rottöne) gibt es auf den unbewachsenen Gebieten rechts der Mitte, da bei Reflexion vom Boden die gesamte Welle auf einmal zurückgestreut wird, der Wirkungsquerschnitt also größer als der Fußabdruck ist. Die Höhe des Untergrunds lässt sich jeweils an den Intensitätsspitzen unter den Kronen erkennen. Die unteren Enden entsprechen nicht der Bodenhöhe, da der Sensor nach Erreichen des Untergrundechos noch einige Zeit Daten aufzeichnet, so dass auch vom Bereich unter dem Boden ein (Rausch-)Signal vorhanden ist.

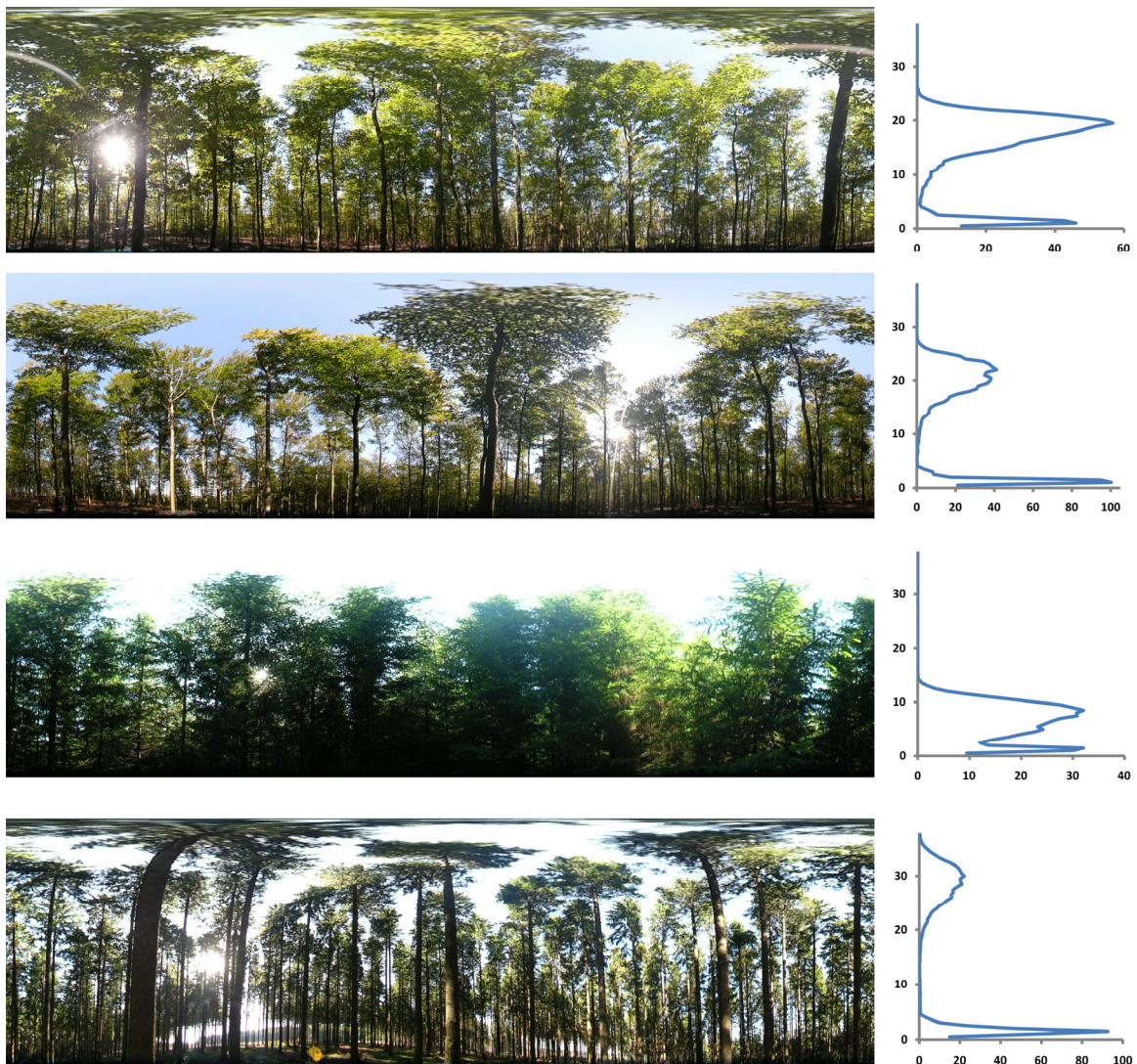


**Abbildung 21:** Bündel von Wellenformen auf einem Bodenabschnitt von 4 m × 4 m. Links sind die Intensitäten zur Ostkoordinate addiert, in der Mitte farblich codiert, rechts ist die mittlere Wellenform über Grund dargestellt.



**Abbildung 22:** Alle Wellen eines Scanstreifens mit farbcodierten Intensitäten.

Abbildung 23 zeigt für vier während der Geländekampagne im Idarwald vermessene Bestände und gemittelte Lidar-Wellenformen in diesen Beständen. Die Fotos der Bestände sind aus hemisphärischen Fischaugenlinsenfotos erstellt. Dafür wurde von jedem Punkt am Rand des kreisförmigen belichteten Bereichs eine Linie zum Mittelpunkt gelegt. Diese Linien wurden nebeneinander gesetzt. Die unterste Zeile der entzerrten Fotos entspricht also dem äußersten Kreis von Pixeln im hemisphärischen Foto, jede weitere Zeile nach oben ist aus weniger Ausgangspixeln zusammengesetzt. Die oberste Zeile entspricht nur noch einem Pixel im Ursprungsbild. Dadurch entsteht der Eindruck eines im Kronenbereich etwas verzerrten Fotos von außerhalb des Bestandes, das einen guten visuellen Eindruck des Bestands vermittelt, da die Stämme wieder senkrecht stehen und nicht wie im ursprünglichen hemisphärischen Foto konzentrisch nach innen zeigen. Von den Koordinaten der Geländemessungen aus wurden jeweils im Umkreis von 7.5 m Lidar-Wellenformen gemittelt und im rechten Teil der Abbildung dargestellt. In diesen Wellenformprofilen kann jeweils erkannt werden, welche Höhe die Bäume haben, welche vertikale Ausdehnung die Kronen aufweisen und welcher Anteil der Laserenergie bis zum Boden durchdringt. So kann beispielsweise erkannt werden, dass von



**Abbildung 23:** Entzerrte hemisphärische Fotos und entsprechende gemittelte Wellenformen in vier Forstbeständen. Die Abszissen zeigen Intensitäten, die Ordinaten Höhen über Grund.

den beiden oben dargestellten Buchenbeständen, die eine vergleichbare Höhe und ein vergleichbares Alter aufweisen, der obere einen höheren Kronenschlussgrad aufweist als der untere. Bei dem oberen Fichtenbestand ist gut zu erkennen, dass die Kronen fast bis zum Boden reichen, während der untere Fichtenbestand die höchsten im Gelände gemessenen Baumhöhen von ca. 36 m aufweist.

### 3.5.3 Rastern der Full-Waveform-Lidar-Daten

Die bisherigen Betrachtungen der Wellenformdaten behandeln Messungen an einzelnen Punkten. Um die Wellenform-Daten in normalen Softwarepaketen zur digitalen Bildverarbeitung zu verwenden oder um sie mit anderen Datenquellen wie Hyperspektraldaten zu verknüpfen, ist es notwendig, sie in flächendeckende Rasterdaten umzuwandeln. In der vorliegenden Arbeit wurde hier ein Voxel-Ansatz (*Volume element*, analog zu *Pixel = Picture element* gebildet) gewählt (vgl. POPESCU & ZHAO 2008, VAN DER ZANDE 2009). Abbildung 24 skizziert nicht maßstabsgerecht die Anordnung von bodenparallelen Voxeln.

Da für das Untersuchungsgebiet Morbach Hyperspektraldaten des Sensors HyMap aus den Jahren 1999 und 2003 mit einer räumlichen Auflösung von  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  vorliegen, wurde für die Voxel die Grundfläche der HyMap-Pixel gewählt. Die vertikale Auflösung wurde auf 50 cm festgelegt. Die höchsten Bäume im Untersuchungsgebiet sind ca. 38 m hoch, so dass jeweils 76 Voxel übereinander erzeugt wurden. Die Begrenzung nach unten ist die jeweilige Höhe des Bodens, so dass also jedes Voxel Informationen zu Wellenformdaten eines  $5\text{ m} \times 5\text{ m} \times 0.5\text{ m}$  großen Volumens über einem HyMap-Pixel enthält. Das Ergebnis kann in Bildverarbeitungsprogrammen wie ein 76-kanaliges Hyperspektralbild behandelt werden; es entspricht ungefähr dem Ergebnis eines Fullwave-Large-Footprint-Laserscans mit quadratischen Foot-

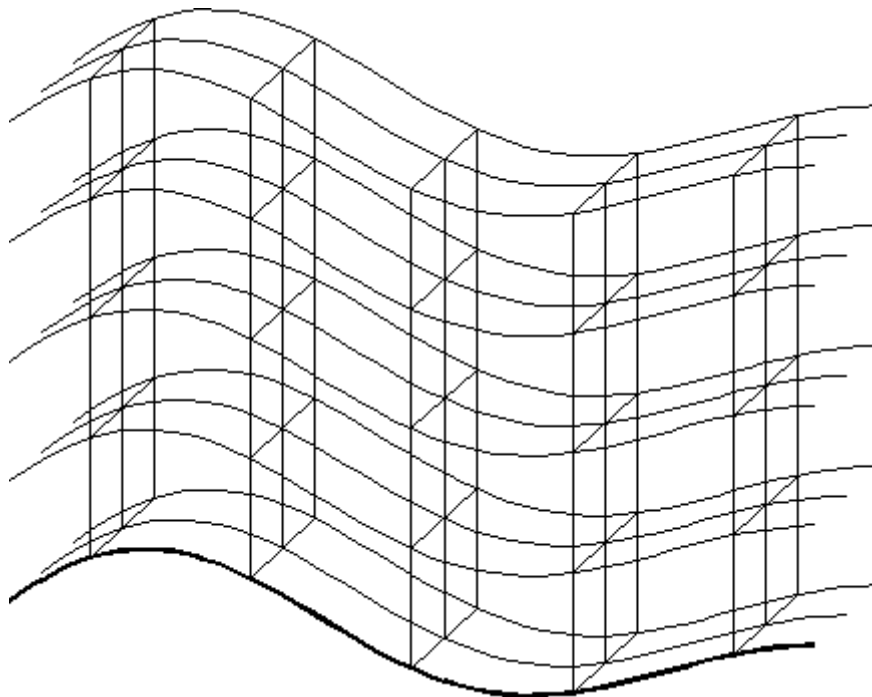


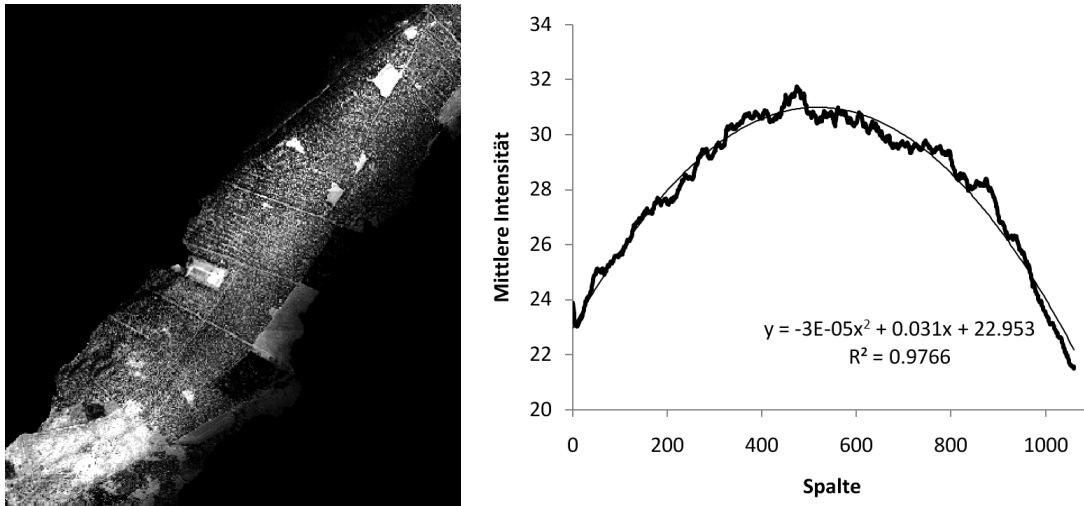
Abbildung 24: Voxels über dem Boden.



prints von 5 m Kantenlänge und 50 cm vertikaler Auflösung. Bei der vorliegenden Punktdichte von 4 Pulsen pro Quadratmeter werden im Mittel 100 Wellenformen pro HyMap-Pixel gemittelt.

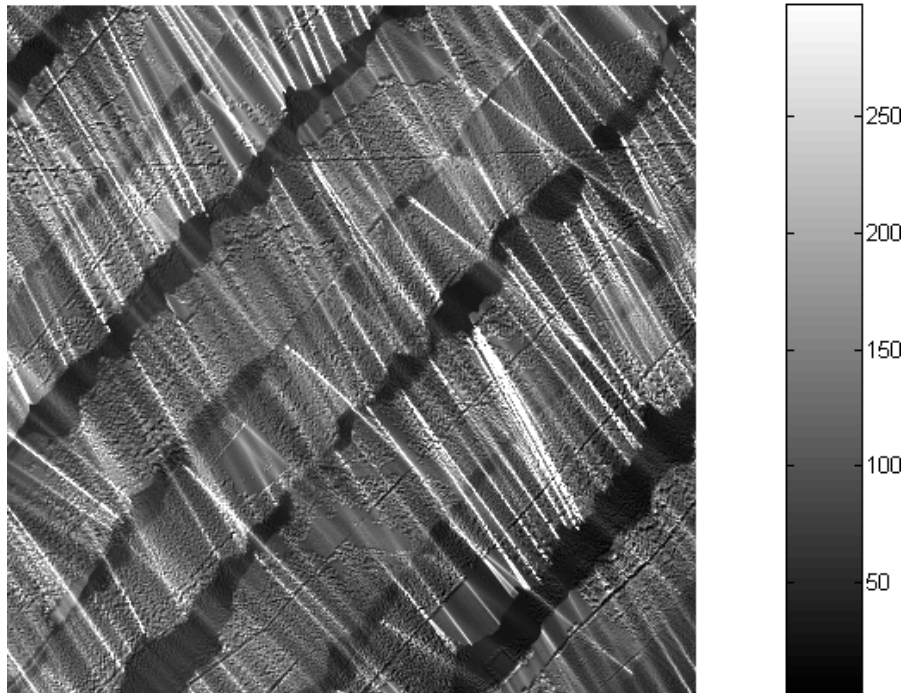
Zur Befüllung der Voxel mit Daten wurde ein Matlab-Programm geschrieben, das in Anhang C.3 abgedruckt ist. Dieses erzeugt zunächst zwei mit Nullen ausgefüllte dreidimensionale Matrizen in der Größe des Ergebnisbildes (Zeilen  $\times$  Spalten  $\times$  76). Ein aus den Last- und Only-Pulse-Daten erzeugtes digitales Höhenmodell des Untersuchungsgebietes, dessen Pixelgröße mit 5 m  $\times$  5 m an das HyMap-Bild angepasst ist, wird geladen, um für jedes Voxel die Höhe des Bodens auslesen zu können. Dann liest das Programm nacheinander jede Welle (insgesamt 199 043 955 Datensätze) und bestimmt die geographischen Koordinaten des Endpunkts der Welle und daraus die Bildkoordinaten in der Voxel-Matrix. Um den Rechenaufwand zu beschränken, wird dabei außer Acht gelassen, dass bei schrägem Einfallswinkel des Laserstrahls die oberen Regionen einer Welle über einem anderen HyMap-Pixel liegen können als die unteren Regionen. Der maximale Auslenkungswinkel im verwendeten Datensatz beträgt 22.5°. Bei der maximalen Baumhöhe von 38 m entspricht dies einem horizontalen Versatz von  $38 \text{ m} \cdot \tan 22.5^\circ = 15.74 \text{ m}$ , also ca. drei Pixeln. Da in den meisten Fällen bei kleineren Bäumen und geringeren Auslenkungswinkeln der Versatz jedoch deutlich kleiner ist, und eine Korrektur dieses Effektes einen erheblichen Aufwand bei voraussichtlich geringem Nutzen bedeutet hätte, wurde dieser Fehler in Kauf genommen. ASNER et al. (2008) fordern für die Fusion von Hyperspektraldaten und Lidar, vor allem bei Betrachtung einzelner Kronen, eine hochpräzise geometrische Übereinstimmung der Daten. Wegen der präzisen parametrischen Geokorrektur der HyMap-Daten, der großen Lagegenauigkeit der Lidar-Punkte und der Anpassung der Pixel im erzeugten Kombinationsbild an die HyMap-Pixel kann davon ausgegangen werden, dass die Übereinstimmung ausreichend ist, insbesondere weil hier in erster Linie Bestände und nicht einzelne Bäume betrachtet werden.

Da nicht jede Welle bis zum Boden durchdringt und bei den Wellen, die bis zum Boden durchdringen auch nach dem Bodenpeak noch eine kurze weitere Zeit das Signal aufgezeichnet wird, wird nicht der Endpunkt der Welle als Höhe des Bodens angenommen, sondern die im DHM gespeicherte Höhe. Von dieser Höhe ausgehend bis zum höchsten Punkt der Welle wird die Welle auf eine vertikale Auflösung von 0.5 m interpoliert. Der so erhaltene Vektor wird in die erste dreidimensionale Matrix geschrieben bzw. zu eventuell bereits vorhandenen Werte addiert. Außerdem wird in der zweiten Matrix der Wert an der Stelle des betroffenen Voxels um 1 erhöht, so dass die Matrix als Zähler der Pulse in jedem Voxel dient.



**Abbildung 25:** Links: Intensität in einem nicht kalibrierten Streifen. Rechts: Über die ersten 5000 Zeilen aller 10 Flugstreifen gemittelte Intensität quer zur Flugrichtung.

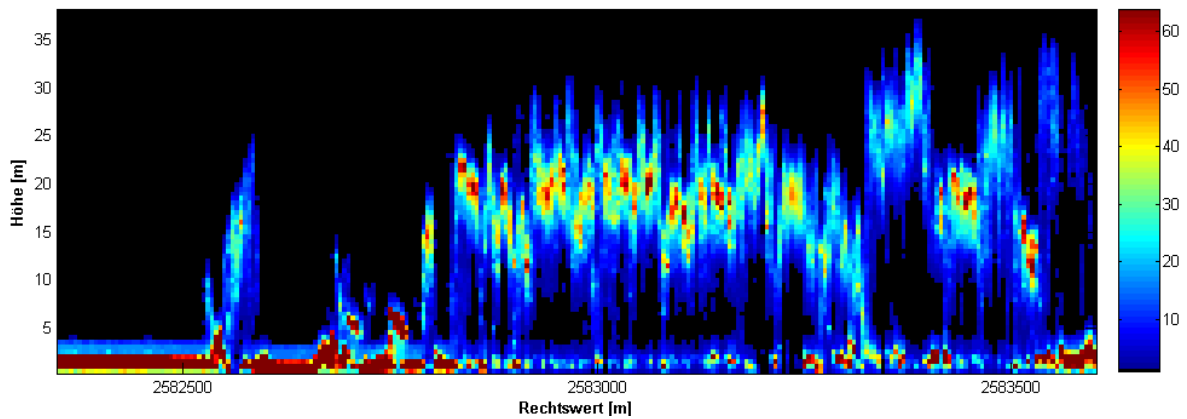
Gemäß der Radargleichung (Formel 3-9) ist die Energie am Empfänger für flächige Ziele umgekehrt proportional zum Quadrat der Entfernung zwischen Flugzeug und Ziel. Damit ergeben sich zwischen in Nadirsicht und bei maximaler Auslenkung aufgenommenen Zielen signifikante Unterschiede in der Intensität des Laserechos. Bei einer Flughöhe von 700 m beträgt damit die Signalstärke bei 22.5° Auslenkung ca. 85 % der Signalstärke im Nadir. Des weiteren tragen Unregelmäßigkeiten der Flughöhe und das Relief zu Variationen der Distanz zwischen Flugzeug und Ziel bei. Im Untersuchungsgebiet Morbach gibt es Geländehöhen zwischen 450 und 750 m über NN. Um diese Effekte auszugleichen, werden die Wellenformen mit dem Quadrat der Distanz zwischen Sensor und reflektierendem Bodenelement multipliziert (LUZUM et al. 2005, HÖFLE & PFEIFER 2007). Laut DONOGHUE et al. (2007) ist eine solche Korrektur bei Winkeln bis ungefähr +/- 15° vom Nadir nicht notwendig. Beim vorliegenden Bild ist jedoch deutlich zu erkennen, dass die Korrektur durchgeführt werden sollte. Ohne diese Korrektur sind im Ergebnisbild die einzelnen Flugstreifen klar zu erkennen, wobei diese am Rand, also bei großen Distanzen zwischen Sensor und Ziel, dunkler erscheinen als entlang der jeweiligen Nadirlinie (vgl. BOYD & HILL 2007). Abbildung 25 zeigt einen Abschnitt des ersten Flugstreifens ohne Korrektur. Die Ränder erscheinen dunkler als die Fläche im Nadirstreifen direkt unter dem Sensor. Nach der Korrektur ergibt sich ein deutlich homogeneres Bild, bei dem die Helligkeitsunterschiede auf den Eigenschaften der beobachteten Gebiete beruhen und nicht auf der Flugparametern (Abbildung 16). Der rechte Teil von Abbildung 25 zeigt die über 50000 Scanstreifen gemittelte Intensität. An die Daten wurde ein Polynom zweiten Grades angepasst. Das hohe Bestimmtheitsmaß zeigt die Plausibilität der quadratischen Helligkeitskorrektur. Das verwendete Laserscannersystem speichert außer der empfangenen Wellenform auch die ausgesandte Welle (REITBERGER et al. 2008). Daher ist es möglich, auch Unregelmäßigkeiten der ausgesandten Laserpulsintensität zu korrigieren. Dafür wird die empfangene Welle durch das Maximum der ausgesandten Welle dividiert. Weitere mögliche Korrekturen, beispielsweise für die unterschiedlich langen Extinktionspfade durch die Atmosphäre, unterschiedliche Ausrichtung der Ziele und unterschiedliche Größe der Ziele, wurden nicht durchgeführt.



**Abbildung 26:** Häufigkeiten von Laserpulsen in Pixeln zu  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  in einem Ausschnitt des Untersuchungsgebiets

Wegen des begrenzten von Matlab nutzbaren Arbeitsspeichers mußten die beschriebenen Berechnungen in vier Kacheln vorgenommen werden. Jede der Kacheln benötigte ca. 26 Stunden Rechenzeit. Die fertigen Kacheln wurden im Bildverarbeitungsprogramm RSI Envi zusammengefügt. Schließlich wurde die beiden Matrizen durch einander dividiert, um für jedes Pixel den mittleren Verlauf der Intensität mit der Höhe zu erhalten. Abbildung 26 zeigt für einen  $400 \times 400$  Pixel, also  $2000\text{ m} \times 2000\text{ m}$ , großen Ausschnitt des Arbeitsgebiets die Anzahl der Laserpulse pro Pixel, also die Summe der Werte pro Pixel in der zweiten Matrix. An diesem Bild lassen sich die Flugstreifen und die Bewegungen des Hubschraubers gut erkennen. Durch Nickbewegungen sind an einigen Stellen Häufungen von Laserpulsen neben relativ dünn besetzten Flächen. Der höchste Wert beträgt 1918 Pulse auf einem Pixel, da aber mehr als 300 Pulse selten sind, geht der Graukeil nur bis 300, alle höheren Werte sind weiß dargestellt. Die meisten Flächen sind auf zwei Flugstreifen erfaßt, in der Mitte der Streifen gibt es aber Gebiete, die nur einmal gescannt wurden. Die Aggregation der Wellenformen auf die HyMap-Pixel reduziert die Datenmenge: Aus 199 Mio. Wellenformen werden ca. 1 Mio. Pixel.

## Schnitte durch die Wellenformdaten

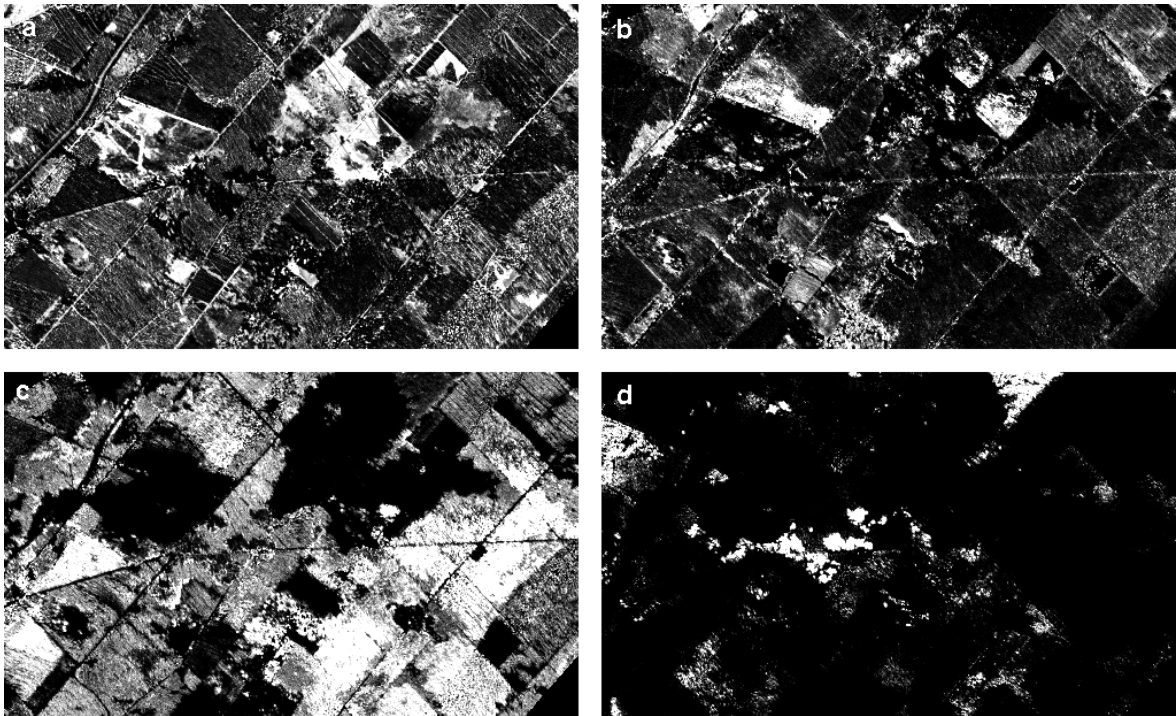


**Abbildung 27:** Vertikalschnitt durch eine Zeile Full-Waveform-Daten. Die Farbe gibt die Intensität der Rückstreuung an.

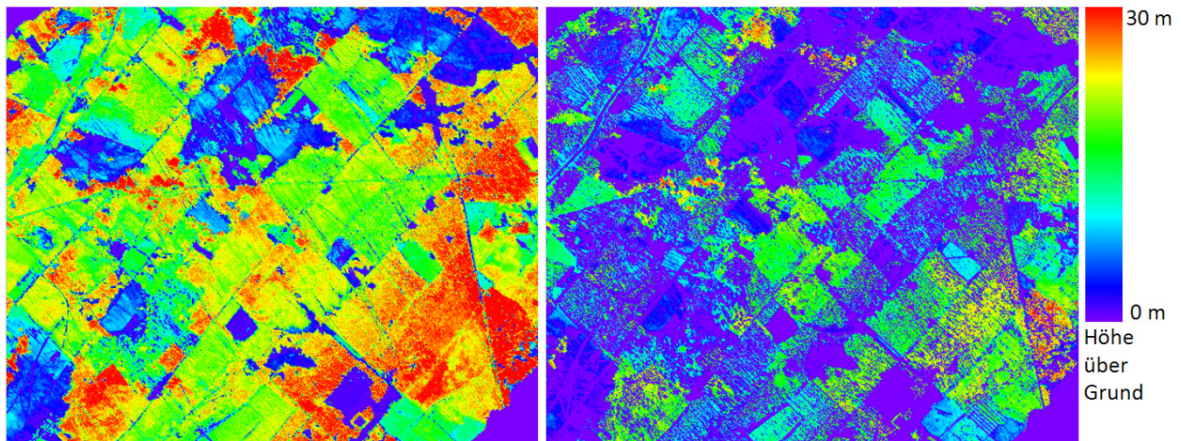
Durch die Transformation der Wellenformdaten in Voxel ist es möglich, vertikale und horizontale Schnitte durch den Wald zu visualisieren. Abbildung 27 zeigt einen überhöhten Vertikalschnitt durch die gerasterten Wellenformdaten. Da jeweils die Geländehöhe subtrahiert wurde, sind in der Graphik Höhen über Grund abgebildet. Die Energieverteilung innerhalb der Baumkronen ist gut zu erkennen. Aus der Energieverteilung lässt sich auf die Verteilung der Biomasse zurückschließen, wobei beachtet werden muss, dass aus den oberen Kronenbereichen bei gleicher Biomasse mehr Energie zurückgestreut wird, als in den darunter liegenden Bereichen. Die höchsten Intensitäten im Kronenbereich liegen meist deutlich unter dem höchsten Punkt. Die absolut höchsten Intensitäten treten bei Reflexionen auf unbedecktem Boden auf.

In Abbildung 28 sind in Horizontalschnitten Intensitätsverteilungen um 0, 10, 20 und 30 m Höhe über dem Boden zu sehen, wobei helle Grautöne hohen Intensitäten entsprechen. Die Bildausschnitte sind jeweils aus drei Voxelschichten gemittelt. Die höchsten Werte am Boden sind in wenig überschirmten Gebieten wie Wegen und Lichtungen zu erkennen. Sehr niedrige Bestände zeigen ihre maximale Reflexion in 10 m Höhe, in 30 m reflektieren nur noch die höchsten Bestände.

Anstatt die Energieverteilung in bestimmten Höhen darzustellen, können auch die Höhen von Intensitätsperzentilen angezeigt werden. Abbildung 29 zeigt die Höhen des 90. und des 20. Perzentils der gerasterten Wellenformen. Das 90. Perzentil liegt knapp unter den Spitzen der Bäume, das 20. Perzentil kann im unteren Kronenbereich oder, bei lückigen Beständen, am Boden liegen. Bei sehr dichten und gleichzeitig hohen Beständen liegt auch das 20. Perzentil in 30 m Höhe über Grund, hier stammt fast die gesamte reflektierte und vom Sensor detektierte Laserenergie aus dem oberen Kronenbereich.



**Abbildung 28:** Horizontale, bodenparallele Schnitte durch die gerasterten Wellenformdaten. Die vier Teilabbildungen zeigen jeweils denselben Ausschnitt, a) am Boden, b) in 10 m, c) in 20 m und d) in 30 m Höhe über Grund.



**Abbildung 29:** Perzentilhöhen. Links: 90., rechts 20. Perzentil.

### Fusionierung von Full-Waveform- und Hyperspektraldaten

Abbildung 30 zeigt die Kombination der aus den beschriebenen Berechnungen resultierenden gerasterten Wellenform-Lidar-Daten mit den Hyperspektraldaten der Befliegung von 2003 sowie einige kombinierte Spektren. Die ersten 122 Kanäle enthalten jeweils die Hymap-Reflexionswerte in Prozent, die folgenden 76 Kanäle die in einen ähnlichen Wertebereich skalierten Lidar-Intensitäten. Die Karte ist ein Farbkomposit, bei dem in grün ein Nahinfrarotkanal von HyMap, in rot die Lidar-Intensität am Boden und in blau die Lidar-Intensität in 30 m Höhe über Grund abgebildet sind. Die Kanäle des RGB-Farbkomposits sind als farbige

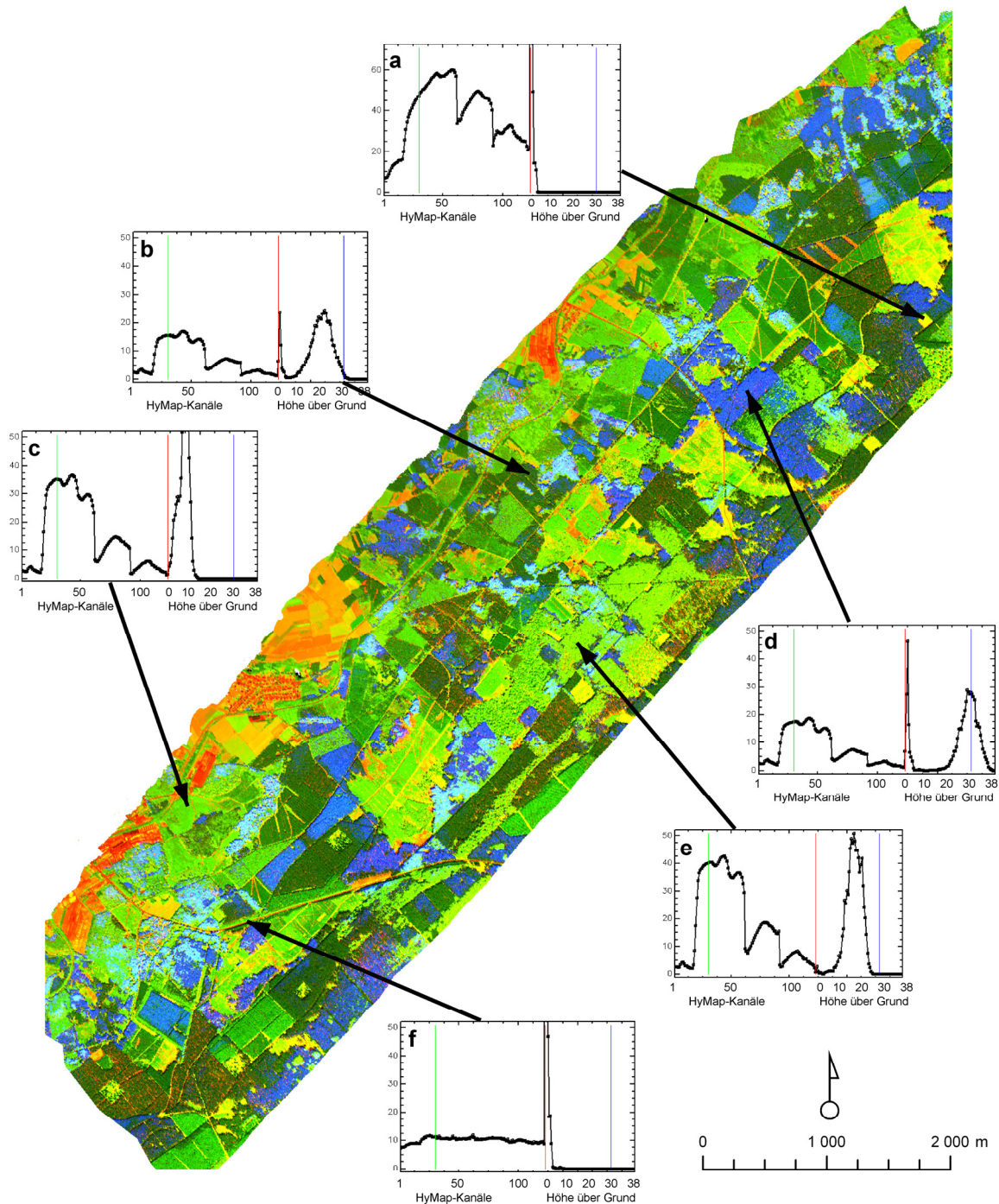


Abbildung 30: Kombinierte Hyperspektral- und Fullwave-Lidar-Daten.

Linien in den Spektren eingezeichnet. Blautöne treten nur bei alten, hohen Beständen auf. Starke Rotanteile weisen auf lückige Bestände oder unbewachsenen Boden hin. Hohe Grünwerte deuten auf Vegetation, insbesondere Laubwald- und Grasflächen, die eine besonders hohe Reflexion im Nahinfrarotbereich haben. Um die Karte sind sechs Spektren angeordnet, die Reflexion und Höhenverteilung in typischen Beständen zeigen. Spektrum a zeigt einen fast unbewachsenen Boden, bei dem kein Laserlicht aus den Regionen über dem Boden reflektiert wurde. Spektrum b zeigt einen Nadelwaldbestand in einer mittleren Entwicklungsphase. Die Bäume sind bis zu 30 m hoch, ein gewisser Anteil des Lichts erreicht den Boden und die Reflexion liegt im Nahinfraroten bei unter 20%. Spektrum c ist ein junger Laubwaldbestand. Die Bäume sind ca. 10 m hoch, die Laserstrahlen dringen kaum bis zum Boden durch und das HyMap-Spektrum zeigt den typischen Verlauf gesunder Reflexion. Bestand d ist ein alter Nadelwaldbestand mit Bäumen bis 38 m Höhe. Der Bestand ist relativ licht, so dass ein starkes Signal vom Boden kommt. Bestand e dagegen lässt keine Laserstrahlen bis zum Boden durchdringen. Er hat dichte Kronen im Bereich zwischen 10 und 25 m über Grund. Spektrum f zeigt eine Straße, die durch den Wald führt. Das hyperspektrale Reflexionsspektrum ist – typisch für Asphalt – sehr flach und die Laserreflexion kommt ausschließlich vom Boden.

Während bei Betrachtung der hyperspektralen Reflexionsspektren alleine beispielsweise im Vergleich der Spektren b und d oder zwischen den Spektren c und e kaum Unterschiede auftreten, bringt die Hinzunahme der Wellenforminformationen einen deutlichen Informationsgewinn und erhöht die Unterscheidbarkeit. Bestände d und e sind deutlich älter als Bestände b und c, was am höheren Kronenbereich zu erkennen ist. Umgekehrt zeigen die Wellenformen auf den unbewachsenen Gebieten a und f keine nennenswerten Unterschiede, die Reflexionsspektren aber sehr wohl.

#### 3.5.4 Ableitung zusätzlicher Punktdaten aus Full-Waveform-Daten

Die vom Datenlieferanten zur Verfügung gestellten Einzelpunktdaten bestehen, wie bereits erwähnt, aus den Datensätzen *First*, *Last*, *Only* und *Ground*. Eine Analyse der Full-Waveform-Daten zeigt jedoch schnell, dass oftmals zwischen dem ersten und dem letzten Echo weitere Pulse existieren (vgl. Abbildung 18, 21 und 41). Um auch diese *Intermediate*-Punkte in Wert setzen zu können, wurden sie aus dem Full-Waveform-Datensatz extrahiert. Die *Intermediate*-Punkte entsprechen im Wald Reflexionen des Laserstrahls aus dem Kronenbereich oder aus dem Unterwuchs. Daher eröffnet ihre Nutzung die Möglichkeit, die Struktur detaillierter zu erfassen, als mit den vom Hersteller gelieferten Punktdaten.

Einen Vergleich von Echo-Detektionsmethoden geben CHAUVE et al. (2009). Zwei alternative Algorithmen wurden mit dem Idarwald-Datensatz getestet.

#### **Ableitung zusätzlicher Punktdaten über Peakdetektion**

Als einfacher Pulserkennungsalgorithmus eine Peakdetektion gewählt. Um als Peak zu gelten, muss ein Wert eine Rauschschwelle bei der Signalintensität überschreiten und größer oder gleich seinem Vorgänger und Nachfolger sein. Für jeden Wert entlang der Fullwave-Kurven,

der diesen Anforderungen genügt, wird die Position in x-, y- und z-Koordinaten berechnet. Um einen Datensatz zu erzeugen, der informationsreicher als der vom Hersteller gelieferte ist, werden zu jedem Punkt weitere Informationen gespeichert: Die Amplitude des jeweiligen Peaks, die Flugstreifennummer und der Auslenkwinkel des Laserstrahls, so dass es mit dem entstehenden Datensatz beispielsweise auch möglich wäre, in einer Auswertung nur nadirnahe Punkte zu berücksichtigen. Schließlich wird jeder Peak als *First*, *Last*, *Only* oder *Intermediate*-Puls klassifiziert und als Textzeile in einer Datei abgespeichert. Die Zieldateien sind dabei wie in Abschnitt 3.4.2 beschrieben in Kacheln von 200 m N-S-Ausdehnung unterteilt. Das verwendete Matlab-Programm zur Ableitung von Punktdaten aus Full-Waveform-Daten ist in Anhang C.4 wiedergegeben.

Die *Intermediate*-Ascii-Dateien der Idarwald-Befliegung umfassen insgesamt 19.1 GB, die *First-Pulse*-Dateien 7.1 GB, die *Last-Pulse*-Dateien 7.5 GB und die *Only-Pulse*-Dateien 2.5 GB.

### Dekomposition der Full-Waveform-Daten

Eine zweite Technik der Ableitung von Punktdaten aus Full-Waveform-Daten besteht in der Dekomposition der Wellenform in einzelne Wellen, üblicherweise in Form von Gaußschen Normalverteilungskurven. HOFTON et al. (2000) entmischen LVIS-Wellenformen in Normalverteilungskurven mit Hilfe nichtlinearer kleinste-Quadrate-Anpassung. KOTCHENOVA et al. (2003) modellieren Wellenformen von SLICER. Die Wellenformen dieser Large-Footprint-Laserscanner sind allerdings nicht mit Small-Footprint-Wellenformen vergleichbar; sie ähneln eher Häufigkeitsverteilungen von Small-Footprint-Punkten oder Summen von Wellenformen über eine Fläche wie den in Abschnitt 3.5.3 beschriebenen Profilen (ROSETTE et al. 2009). PERSSON et al. (2005) entmischen Daten des Laserscanners TopEye Mark II auf ähnliche Weise. WAGNER et al. (2006) berechnen über Gaußsche Dekomposition die Wirkungsquerschnitte unterschiedlicher Reflektoren im Weg des Laserstrahls eines Riegl LMS-Q560-Scanners. Sie zeigen, dass die Wellenformen dieses Scanners sehr gut mit Gaußkurven übereinstimmen. REITBERGER et al. (2006, 2008) verwenden ein Levenberg-Marquardt-Iterationsschema, um Gaußkurven an Full-Waveform-Daten desselben Scanners anzupassen. CHAUVE et al. (2009) passen generalisierte Gaußkurven mit einem verbesserten iterativen Verfahren an Wellenformen an und können so die Residuen zwischen gemessenen und modellierten Kurven verringern. Die Daten stammen, ebenso wie die in der vorliegenden Arbeit, ebenfalls von einem Riegl LMS-Q560.

Die Grundannahme für die Dekomposition der empfangenen Wellen in Gaußkurven ist, dass die Wellen  $P_r$  als Funktion der Zeit  $t$  sich als Summe von  $N$  solcher Kurven darstellen lassen:

$$P_r(t) = \sum_{i=1}^N \hat{P}_i \exp\left(\frac{-(t - t_i)^2}{2s_{p,i}^2}\right) + \varepsilon(t). \quad (3-13)$$

Dabei ist  $t_i$  der Peak-Zeitpunkt der  $i$ -ten Gaußkurve,  $s_{p,i}$  ihre Standardabweichung und  $\hat{P}_i$  ihre Amplitude (WAGNER et al. 2008).  $\varepsilon(t)$  ist ein Fehlerterm, der das Rauschen der empfangenen Welle enthält.



In der vorliegenden Arbeit wurde ein möglichst einfacher und schneller Ansatz gesucht, um ebenfalls eine Dekomposition der Wellenformen in einzelne Gaußkurven zu erhalten, da bei der Anzahl von ca. 200 Mio. Wellenformen ansonsten die Rechenzeit sehr groß geworden wäre. Der Algorithmus sollte ohne iterative Optimierung und ohne kleinste-Quadrate-Anpassung auskommen. Im Gegensatz zu den Arbeiten von REITBERGER et al. (2006, 2008) wurde in der vorliegenden Arbeit auf eine Glättung der Wellenformen und auf die Berechnung und Elimination eines individuellen Grundrauschens pro Wellenform verzichtet, weil auch ohne diese Schritte eine gute Dekomposition möglich war.

Der Algorithmus sucht in jeder Wellenform das Maximum und testet, ob es größer als eine Rauschschwelle ist. Wenn ja, wird die Spitzheit  $sp$  der resultierenden Gaußkurve aus dem Verhältnis der mittleren Differenz des Maximalwerts zum vorletzten Wert und dem übernächsten Wert zur Höhe des Maximalwerts bestimmt:

$$sp = \frac{I(x_{max}) - \frac{I(x_{max} - 2) + I(x_{max} + 2)}{2}}{I(x_{max})}, \quad (3-14)$$

wobei  $I$  der Funktionswert (Intensität) der Kurve und  $x_{max}$  die Stelle des maximalen Wertes ist. Tests mit unterschiedlichen Kurven konnten zeigen, dass ein logarithmischer Zusammenhang zwischen  $sp$  und der Standardabweichung  $\sigma$  der Gaußkurve besteht mit

$$\sigma = -1.333 * \ln(sp) + 0.7877. \quad (3-15)$$

Die genaue Position des Mittelwertes  $\mu$  des aktuellen Echos wird aus der Form der Spitze bestimmt. Sie kann um bis zu 0.5 nach rechts oder links vom Maximalwert verschoben werden. Als Maß wird das Verhältnis der Steigung vor dem Maximalwert zur Steigung nach dem Maximalwert verwendet

$$st = \frac{I(x_{max}) - I(x_{max} - 1)}{I(x_{max}) - I(x_{max} + 1)}. \quad (3-16)$$

$st$  kann Werte zwischen 0 und unendlich annehmen. Diese Extremwerte werden erreicht, wenn zwei benachbarte Punkte im Peak den gleichen Intensitätswert aufweisen, also der Zähler oder der Nenner von Gleichung (3-16) den Wert 0 annimmt. In diesen Fällen wird  $\mu$  um den Maximalwert von 0.5 verschoben; das Maximum des Peaks liegt dann also genau zwischen den beiden Höchstwerten des Peaks.  $\mu$  wird berechnet mit

$$\mu = x_{max} - e^{st \cdot \ln 0.5} + 0.5. \quad (3-17)$$

Aus  $\mu$  können mit Formel (3-12) die Koordinaten des betrachteten Pulses berechnet werden, wobei  $\mu$  die Stelle von  $i$  einnimmt, also anzeigt, wie viele *Bins* der Mittelpunkt des aktuellen Peaks vom Beginn der Aufzeichnung entfernt liegt.

Die Intensität des Echos wird, wie im vorherigen Abschnitt beschrieben und wie auch vom Datenlieferanten durchgeführt, als

$$I_i = \mu \cdot I(x_{max}) \cdot \frac{D^2}{I_{max} \text{ (Startwelle)}} \quad (3-18)$$

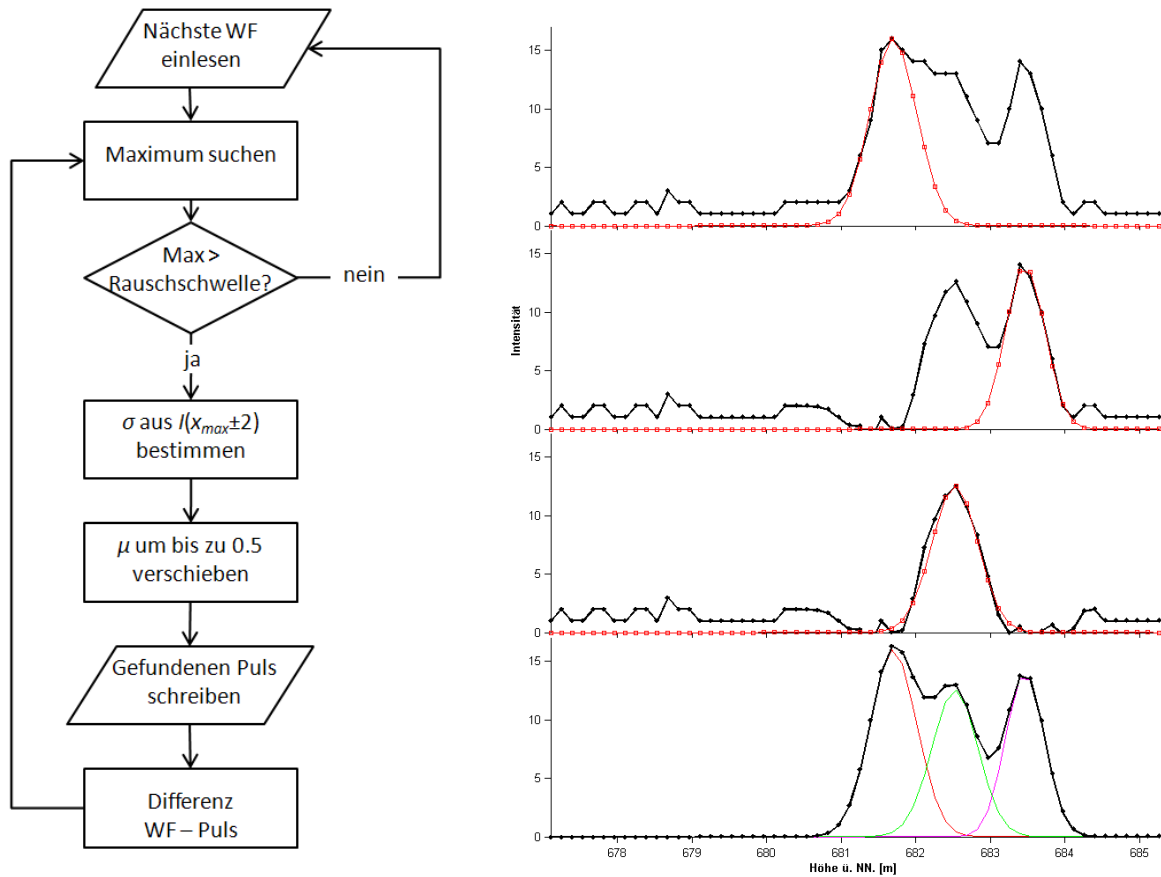
berechnet, wobei  $D$  die Distanz zwischen Sensor und Objekt ist und  $I_{max} \text{ (Startwelle)}$  die maximale Intensität der ausgesandten Startwelle.

Die  $x$ -,  $y$ - und  $z$ -Koordinaten des Peaks sowie die Intensität werden als Textzeile abgespeichert, wobei wiederum einzelne Kacheln mit 200 m N-S-Ausdehnung erzeugt werden. Mit den jetzt bekannten Werten für  $\mu$  und  $\sigma$  und der Amplitude der Kurve  $I(x_{max})$  kann eine simulierte Intensitätskurve  $G$  des aktuellen Echos berechnet werden:

$$G = I(x_{max}) \cdot \exp\left(-\frac{(x - \mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right). \quad (3-19)$$

Diese wird von der Wellenform subtrahiert, so dass der Vorgang wiederholt werden kann, bis kein Peak über der Rauschschwelle mehr gefunden wird. Abbildung 31 zeigt links ein Flussdiagramm des Algorithmus zur Dekomposition der Wellenformen und rechts ein Beispiel der Dekomposition. Oben sind die ursprüngliche Welle und eine an den höchsten Peak angepasste Gaußkurve zu sehen. Darunter ist die Restwellenform nach Subtraktion der ersten simulierten Kurve abgebildet, darunter die Restwelle nach Subtraktion der beiden ersten Kurven. Ganz unten sind die drei Gaußkurven und in schwarz die Summe der drei Kurven, also die simulierte Ursprungswelle zu sehen.

Ein Vorteil der Dekomposition der Wellenformen in einzelne Kurven ist, dass auch überlappende Signale getrennt werden können, wenn ihr Abstand nicht kleiner als das Auflösungsvermögen des Scanners ist (WAGNER et al. 2006). Ein Beispiel für die Auflösung überlappender Signale ist in Abbildung 31 zu sehen. Das im dritten Schritt gefundene Echo hat in der ursprünglichen Wellenform keinen Peak, dieser wird erst nach Subtraktion des ersten Peaks sichtbar. Das im vorherigen Abschnitt beschriebene Verfahren hätte also den dritten Puls hier nicht finden können, da er keinem lokalen Maximum in der ursprünglichen Wellenform entspricht. Ein weiterer Vorteil gegenüber der einfachen Peak-Detektion ist die Ableitung der Breite  $\sigma$  der Wellen. So können beispielsweise waagerechte und schräge reflektierende Flächen unterschieden werden. Auf schrägen Flächen findet eine Verbreiterung des Pulses statt (HUG et al. 2005).



**Abbildung 31:** Links: Vereinfachte Darstellung des Algorithmus zur Dekomposition. Rechts: Schrittweise Dekomposition einer Wellenform in drei Gaußkurven

Laut KIM et al. (2003) wird in Waldbeständen von weniger als 0.1 % der Laserpulse ein fünftes Echo zurückgeworfen, ein viertes Echo reflektieren 1% der Pulse. Beim vorliegenden Datensatz ist die Verteilung anders: Bei 74% der Pulse wurde ein zweites Echo detektiert, bei 39% ein drittes, bei 13% ein viertes, bei 3% ein fünftes, bei 0.6% ein sechstes, bei 0.1% ein siebtes und bei 0.02% ein achttes Echo. Diese Werte hängen stark von der eingesetzten Methode, ein Echo zu erkennen, ab. Da im beschriebenen Algorithmus allerdings eine relativ hohe Rauschschwelle angesetzt wurde, ist davon auszugehen, dass die gefundenen Echos tatsächlich Reflexionen des Laserstrahls an Objekten entsprechen.

# Kapitel 4 Ableitung struktureller Forstparameter aus Laserscanning

Bei der Auswertung der Lidar-Daten wurde der Schwerpunkt auf die Ableitung von strukturellen Forstparametern gelegt. Die Bestandsstruktur ist die raumzeitliche Organisation inklusive der Position, der Ausdehnung, der Menge, des Typs und des Zusammenhangs der oberirdischen Vegetationskomponenten. Sie enthält eine erhebliche Menge von Informationen über den Entwicklungsstand von Pflanzengesellschaften und damit auch über ihre Funktion und die Habitatbedingungen (LEFSKY et al. 1999a, 2002). Die einfachsten Bestandsstrukturmaße sind die Baumhöhe, die Anzahl der Bäume pro Fläche und der Bedeckungsgrad. Komplexere Maße sind z.B. der Blattflächenindex, die Biomasse oder der Holzvorrat. In diesem Kapitel werden Möglichkeiten, diese Maße aus luftgestützten Laserscannerdaten abzuleiten, diskutiert und mit alternativen fernerkundlichen Techniken und mit Geländemessungen verglichen.

## 4.1 Baumhöhenschätzung

Die Baumhöhe ist eine der wichtigsten Bestandsgrößen und hat eine direkte und von der Wissenschaft immer besser verstandene Beziehung zum überirdisch gespeicherten Kohlenstoff (LEFSKY et al. 2005). Traditionell wird die Baumhöhe über Geländemessungen oder photogrammetrische Messungen ausgewählter Bäume bestimmt (NÆSSET 1997a), inzwischen wird auch Laserscanning operationell eingesetzt. Während in der traditionellen Photogrammetrie immer zwei Bilder notwendig sind, um per Stereoauswertung dreidimensionale Informationen zu erhalten, genügt im Falle des Laserscanning ein Datensatz, da neben der Richtung eines Laserstrahls auch dessen Laufzeit gemessen wird (WAGNER et al. 2003).

Vor der Beschreibung der Baum- und Bestandshöhenschätzung mit Lidardaten soll zunächst auf einige alternative Verfahren eingegangen werden.

### 4.1.1 Baumhöhenmessung im Gelände

Direkte Messungen der Baumhöhe im Gelände sind zeitaufwendig und können immer nur stichprobenweise durchgeführt werden. Trotz des hohen Aufwands ist die Genauigkeit der terrestrischen Messungen begrenzt (HILDEBRANDT 1996). Inmitten eines Bestandes ist es häufig schwierig, die Spitze eines Baumes anzupeilen, weil meist andere Bäume die Sicht verdecken. Ein gewisser Teil der Variation zwischen fernerkundlich und im Gelände gemessenen Höhen ist also immer auch den Messungenauigkeiten im Feld geschuldet.

Mit Geräten wie dem bei der Geländekampagne verwendeten Haga Höhenmesser werden in einem festgelegten horizontalen Abstand vom Baum die Baumspitze und der Fußpunkt angepeilt und dabei der Winkel festgehalten. Die Höhen ergeben sich aus einfachen trigonometrischen Zusammenhängen und lassen sich direkt am Gerät ablesen (KÖHL et al. 2006).

### 4.1.2 Baumhöhenschätzung durch Photogrammetrie

Die Baumhöhenschätzung ist ein klassisches Arbeitsfeld der photogrammetrischen Luftbilddauswertung. Hier wird in einem Luftbildpaar die Parallaxe gemessen, also die scheinbare Verschiebung eines Punktes in Abhängigkeit seiner Höhe, wenn er aus zwei verschiedenen Richtungen aufgenommen wird (KRAUS 2004). Die Genauigkeit der stereophotogrammetrischen Auswertung hängt von den Eigenarten des vermessenen Objekts ab. Die Objekthöhen werden aus Messungen von Objektfuß- und Gipfelpunkt bestimmt. In geschlossenen Waldbeständen besteht das Problem, dass selten freie Sicht auf den Waldboden besteht, so dass Baumhöhenmessungen nur am Waldrand oder an Lichtungen gut durchgeführt werden können (HILDEBRANDT 1996). Wegen des relativ hohen Aufwands einzelner Messungen, wird meistens nur eine kleine Stichprobe von Bäumen photogrammetrisch vermessen (NÆSSET 1997a). Die klassische analoge Luftbilddauswertung ist inzwischen größtenteils von der digitalen Photogrammetrie abgelöst (LINDER 2006).

### 4.1.3 Baumhöhenschätzung aus Daten optischer Satelliten

Bei der Baumhöhenschätzung mit optischen Satelliten ist zu unterscheiden zwischen Verfahren, die mit statistischen Methoden aus dem aufgezeichneten Reflexionsspektrum auf die Baumhöhe schließen und solchen, die die Höhe der Oberfläche dreidimensional messen und daraus die Baumhöhe berechnen. Einige optische Erdbeobachtungssatelliten haben die Fähigkeit, ein Gebiet aus unterschiedlichen Blickwinkeln zu beobachten. Hier gibt es wiederum zwei Konzepte: Entweder wird der Sensor quer zur Flugrichtung geschwenkt, so dass die beiden Beobachtungen während unterschiedlicher Überflüge durchgeführt werden (z.B. bei den Satelliten SPOT 1 bis 3 und beim geplanten Satelliten EnMap). Oder ein Sensor blickt gleichzeitig in unterschiedliche Richtungen entlang seines Flugpfades (z.B. nach vorne und hinten), so dass innerhalb eines einzigen Überflugs unterschiedliche Blickwinkel aufgezeichnet werden (z.B. bei der Kamera HRSC-A oder bei den Satellitensensoren ALOS/PRISM, ASTER, SPOT 5 und CHRIS/PROBA). NANDAKUMAR et al. (2004) geben als Höhengenaugigkeit für Geländemodelle aus SPOT-5-Daten 20 m für 89% der Punkte an, 10 m für 75% und 5 m für 58%.

Als Beispiel für eine statistische Beziehung stellten DONOGHUE & WATT (2006) für verschiedene Kanäle der Satellitensensoren Landsat ETM+ und Ikonos Potenzregressionen der Form  $y = ax^b$  auf und konnten damit Bestimmtheitsmaße ( $R^2$ ) gegenüber Feldmessungen der Baumhöhen von bis zu 0.86 (ETM+ Kanal 3) erreichen.

ST-ONGE et al. (2006) erstellten aus einem Ikonos-Stereopaar ein Oberflächenmodell und berechneten Baumhöhen durch Subtraktion eines Lidar-Geländemodells von diesem Oberflächenmodell. Dabei konnte ein  $R^2$  von 0.87 zu Feldmessungen der Baumhöhen erreicht werden.

CHOPPING et al. (2009) verwendeten multidirektionale Satellitendaten des Sensors MISR mit einer räumlichen Auflösung von 275 m zur Ableitung von Baumhöhen. Die Ergebnisse wurden mit Lidar verifiziert. Dabei konnten RMS-Fehler von 2.5 bis 3.7 m erreicht werden.

#### 4.1.4 Baumhöhenschätzung per Radar

Radar (*Radio detecting and ranging*) wird ebenfalls verwendet, um Baumhöhen fernerkundlich zu messen. Es gibt hierfür vor allem zwei Verfahren: *Synthetic Aperture Radar* (SAR) Systeme, die in verschiedenen Wellenlängenbändern arbeiten, um gleichzeitig die Geländehöhe (P-Band) und die Bestandsoberfläche (C-, X- oder L-Band) zu messen, sowie SAR-Interferometrie (InSAR oder IFSAR) und polarimetrische SAR-Interferometrie (Pol-InSAR), bei der die dreidimensionale Information aus der Aufnahme der gleichen Szene aus mindestens zwei unterschiedlichen Blickwinkeln stammt (BREIDENBACH et al. 2006). HYYPPÄ & HALLIKAINEN (1996) nutzten als weiteres Verfahren ein nicht-bildgebendes Radar-Scatterometer, um Baumhöhenprofile abzuleiten.

MOREIRA et al. (2001) nutzten aus, dass kurzwelliges X-Band-Radar an der Bestandsoberfläche zurückgestreut wird, während langwellige P-Band-Radarstrahlen tief in einen Bestand eindringen können. Aus der Differenz zwischen dem X-Band-Oberflächenmodell und dem P-Band-Geländemodell wurde so die Bestandshöhe im brasilianischen Amazonasgebiet mit einem RMS-Fehler von 1.92 m ermittelt. Der P-Band-Sensor wurde interferometrisch mit zwei Überflügen verwendet und konnte die Erdoberfläche mit einem RMS-Fehler von 2 m abbilden. Das X-Band-Radar erreichte in einem einzelnen Überflug eine Höhengenaugigkeit der Bestandsoberfläche von 0.5 m.

MERCER (2004) stellte eine Radarbefliegung des gesamten Gebiets von England und Wales vor. In einer Teilstudie wurden Baumhöhen aus der Differenz von X- und P-Band-Signalen berechnet. Die Abweichung gegenüber Lidarmessungen reicht von unter 2 m für kleine Bäume auf flachem Terrain bis über 5 m für Bäume über 35 m Höhe und Geländeneigungen von über 20°.

HYDE et al. (2006) verwendeten die Differenz zwischen einem X-Band-InSAR-Oberflächenmodell und einem DHM des USGS zur Ableitung von Baumhöhen. Dabei wurden mit 11 m RMSE deutlich schlechtere Ergebnisse erzielt als mit zeitgleich durchgeführten Lidar-Messungen. Ähnliche Ergebnisse wurden mit Höhenschätzungen mit Daten der Satellitensensoren Landsat ETM+ und Quickbird erzielt. Die Kombination aller Daten außer Lidar konnte ähnlich gute Baumhöhenschätzungen wie Lidar alleine erzielen.

BREIDENBACH et al. (2006) konnten durch ein Oberflächenmodell aus X-Band-InSAR und ein Lidar-DHM Baumhöhen in einem Wald in Baden-Württemberg mit einem RMS-Fehler von 2.69 m schätzen, während die Differenz zwischen first-pulse-Lidar und dem DHM Schätzwerte mit einem RMS-Fehler von 1.85 m ergab.

METTE et al. (2006) nutzten in einer nach PAPATHANASSIOU & CLOUDE (2001) weiterentwickelten Methode Pol-InSAR im L-Band, um in einem Wald in Bayern Baumhöhen und daraus Biomasse zu schätzen. Die Kreuzkorrelation zwischen den beiden Bildern eines interferometrisch auswertbaren Bildpaares nimmt mit zunehmender Durchdringungstiefe ab. Mit Radar-daten einer einzelnen Polarisation kann die Baumhöhe bereits gut mit Hilfe einer sinc-Funktion geschätzt werden. Bei Verwendung aller Polarisationskombinationen (HH, VV,

HV und VH) konnte ein verfeinertes Modell zu noch besseren Schätzungen verwendet werden. Die exakten Schätzgenauigkeiten werden nicht genannt.

ANDERSEN et al. (2005, 2006) schlagen vor, kostengünstiges flugzeug- oder satellitengestütztes X-Band-IFSAR zu verwenden, um per Laserscanning erhobene Wald-Höhenmodelle zeitlich fortzuschreiben. X-Band-Radar kann nicht bis zum Boden durchdringen, aber Oberflächenmodelle von ähnlicher Qualität wie Lidar erzeugen. Aus diesen können durch Subtraktion von Bodenmodellen aus Lidar-Befliegungen die Baumhöhen abgeleitet werden. Probleme sind dabei die geringere räumliche Auflösung vor allem satellitengestützter Radardaten, das Signal-Rausch-Verhältnis bei IFSAR und die Abschattung mancher Waldgebiete durch den flachen Blickwinkel von Radarsystemen. Der Unterschied zwischen Lidar- und Radarmessungen weist eine Standardabweichung von ca. 5 m auf, wobei die Flughöhe und die Beobachtungsgeometrie nur geringen Einfluss haben. Der Fehler kann durch Verwendung mehrerer Überflüge verringert werden.

#### 4.1.5 Baumhöhenschätzung mit Laserscanning

Die Ableitung der Baumhöhe ist die naheliegendste Anwendung von Laserfernerkundung in Waldgebieten. Bereits ARP et al. (1982), NELSON et al. (1984, 1988), NILSSON (1988), RITCHIE et al. (1993) und NELSON (1997) nutzten *Laser Profiling*, um Baumhöhen abzuschätzen. ARP et al. (1982) schätzten die Genauigkeit von 140 verwendeten Punkte auf 2.6 m. NELSON et al. (1988) konnten Baumhöhen, Holzvolumen und Biomasse mit guter Genauigkeit schätzen. Für alle Baumarten wurde ein Bestimmtheitsmaß von 0.67 angegeben, für einzelne Arten konnte die Höhe der dominanten Bäume mit einem Bestimmtheitsmaß von 0.91 gemessen werden.

Seit Laserscanning verfügbar ist, wurde es von NÆSSET (1997a) und zahlreichen nachfolgenden Autoren zur flächendeckenden Baumhöhenbestimmung eingesetzt. NÆSSET (1997a) unterschätzte die mittlere Baumhöhe gegenüber Geländemessungen um 4.1–5.5 m, konnten die Abweichungen aber durch Mittelwertbildungen noch deutlich verbessern.

Bei der halbzufälligen Verteilung der Laserpunkte ist es unwahrscheinlich, dass die Spitze eines Baumes genau getroffen wird (EVANS et al. 2001, LEFSKY et al. 2002, BRANDTBERG 2007). Daher gilt es als gemeinhin anerkannt, dass – insbesondere von Nadelbäumen – die Höhe unterschätzt wird (NILSSON 1996, NÆSSET 1997a, POPESCU et al. 2002, DONOGHUE & WATT 2006). Ein weiteres Problem für die genaue Bestimmung der Baumhöhe ist die schwierige Unterscheidung von Boden und Unterwuchs in Waldbeständen (LEFSKY et al. 2002, HYYPPÄ et al. 2008). Auch eine starke Hangneigung kann die Baumhöhenschätzung nachteilig beeinflussen. Ist ein Baum zum Hang geneigt, wird seine Höhe unterschätzt, ist er vom Hang weg geneigt, wird sie überschätzt (HYDE et al. 2005, HYYPPÄ et al. 2006, BREIDENBACH et al. 2006). Außerdem ist es möglich, dass das Echo vom höchsten Punkt eines Baumes zu schwach ist, um aufgefangen zu werden (LEFSKY et al. 2002, YU et al. 2004).

Um die Höhe typischer dominanter Bäume (die Oberhöhe) im Bestand zu erfassen, dürfen nur die höchsten Werte in einer Umgebung verwendet werden. Da allerdings auch immer

Ausreißer möglich sind und meistens nicht die Höhe der größten Bäume sondern die des Bestandes von Interesse ist, ist die Verwendung des maximalen Wertes nicht empfehlenswert (NÆSSET 2009a, HOPKINSON et al. 2008).

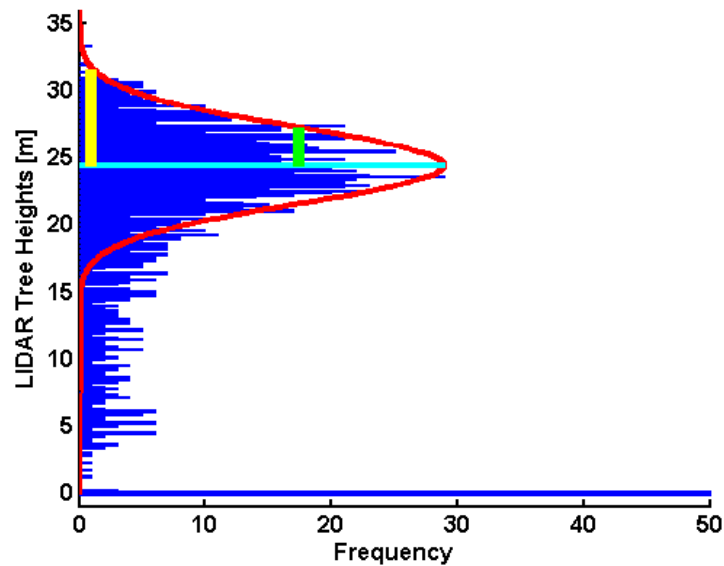
Für das Untersuchungsgebiet Idarwald wurden die Baumhöhen aus zwei unterschiedlichen Varianten des vorliegenden Datensatzes abgeleitet: Aus Einzelpunktdaten und aus einem gerasterten Bild. Bei Einzelpunktdaten ist die Informationsdichte höher als bei gerasterten Bildern, daher ist hier mit einer größeren Genauigkeit der Baumhöhenschätzung zu rechnen. Der Rechenaufwand ist allerdings bei Rasterbildern kleiner, und die Ergebnisse von auf Rasterbildern beruhenden Berechnungen leichter auf große Flächen übertragbar, so dass auch aus den Rasterdaten Baumhöhen geschätzt werden.

### **Ableitung der Baumhöhe aus Einzelpunktdaten**

Für die Ableitung der Baumhöhe aus Einzelpunktdaten, deren Höhe über NN oder einem Ellipsoid angegeben ist, besteht das Grundproblem, dass nicht zu jedem Laserecho im Bestand ein Bodenpunkt vorliegt, und somit die Höhe über Grund nicht direkt bestimmbar ist. RIAÑO et al. (2003) interpolieren für die x- und y-Position jedes First-Pulse-Punktes aus den umliegenden Bodenpunkten die Bodenhöhe. Diese wird von dem jeweiligen Punkt subtrahiert, um die Höhe über Grund zu erhalten. In der vorliegenden Arbeit wurden nicht die einzelnen Bodenpunkte, sondern stattdessen der gerasterte Bodendatensatz, das DHM, verwendet. Zu jedem Punkt, dessen Höhe über NN angegeben ist, wird das entsprechende DHM-Pixel gesucht und von der Punkthöhe subtrahiert.

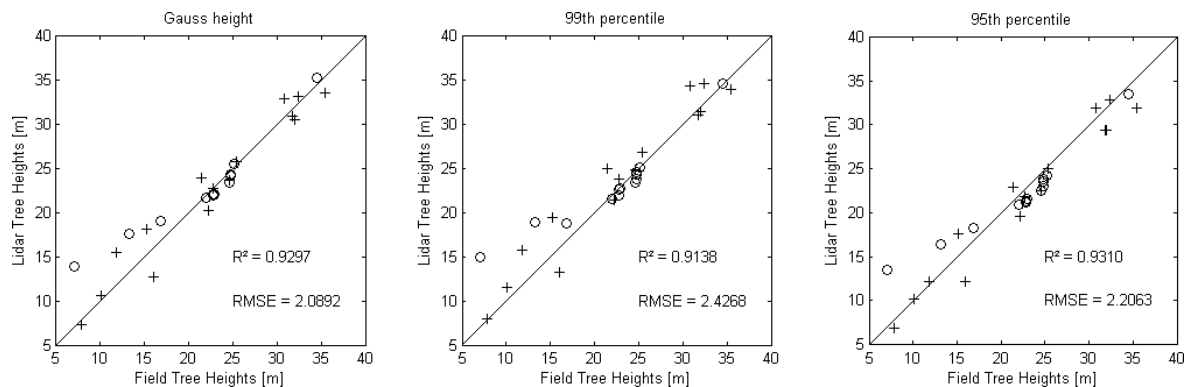
In Histogrammdarstellung der Häufigkeitsverteilung der Höhen der First/Only-Punkte in einer kleinen Fläche fällt auf, dass die Verteilung der Höhenwerte im Bereich der Baumkronen immer stark einer Normalverteilung ähnelt (vgl. WAGNER et al. 2006). Um dies mit einer robusten Schätzmethode auszunutzen, wurde zur Schätzung der tatsächlichen Baumhöhen an die Histogrammwerte eine Normalverteilung, beschrieben durch die Parameter Mittelwert und Standardabweichung, angepasst. Der Schätzwert für die Baumhöhe wurde berechnet als Mittelwert plus 2 Standardabweichungen, um der systematischen Unterschätzung der Baumhöhen bei Lidar-Messungen Rechnung zu tragen. Damit konnten die im Gelände gemessenen Höhen mit einem Bestimmtheitsmaß von  $r^2 = 0.93$  und einem mittleren Fehler (RMSE) von 2.1 m geschätzt werden. Abbildung 32 zeigt ein Histogramm von Höhen über Grund in einem Teil eines Waldbestandes sowie die angepasste Normalverteilungskurve mit Mittelwert und einfacher und doppelter Standardabweichung. Gegenüber der üblichen Darstellung von Histogrammen sind die Achsen vertauscht, so dass die Höhen auf der Ordinate aufgetragen sind.





**Abbildung 32:** Häufigkeitsverteilung von First/Only-Laserpunkten. Markiert sind eine an die Kronenpunkte angepasste Normalverteilungskurve (rot), ihr Mittelwert (cyan) und die Standardabweichung (grün) sowie die doppelte Standardabweichung (gelb).

Eine Alternative zur Ableitung der Baumhöhen aus der Standardabweichung der Normalverteilungskurve ist die Verwendung von Perzentilen der Höhenverteilung. Perzentile werden u.a. von NÆSSET (1997a), RIEGER et al. (1999), NÆSSET & GOBAKKEN (2008) und ROSETTE et al. (2009) eingesetzt. Vorteile der Verwendung von Perzentilen sind, dass kein Perzentil höher als der höchste Messwert sein kann und dass der Rechenaufwand geringer ist als bei der vorher beschriebenen Methode. Des Weiteren ist die Hypothese normalverteilter Daten nicht notwendig (GOBAKKEN & NÆSSET 2005). Abbildung 33 zeigt den Vergleich der im Gelände gemessenen Höhen mit den aus den Einzelpunkt-Lidardaten berechneten Höhen. Bei Verwendung des 99. Perzentils werden die Höhen leicht überschätzt, beim 95. Perzentil leicht unterschätzt. Bestimmtheitsmaß und mittlerer Fehler sind bei allen drei vorgestellten Methoden sehr gut. Die größte Abweichung besteht bei einem Buchenbestand, der im Gelände mit 7 m Höhe gemessen wurde, in den Lidardaten jedoch bis zu 15 m hoch erscheint. Hier liegt wahrscheinlich ein Fehler in der Positionsbestimmung des Geländeplots vor. Ein benachbarter Bestand hat in den Lidardaten eine Höhe von ca. 7 m.



**Abbildung 33:** Baumhöhenschätzung von Buchen (o) und Fichten (+) aus Einzelpunkt-Lidardaten nach Normalverteilungsmethode, mit dem 99. Perzentil und mit dem 95. Perzentil.

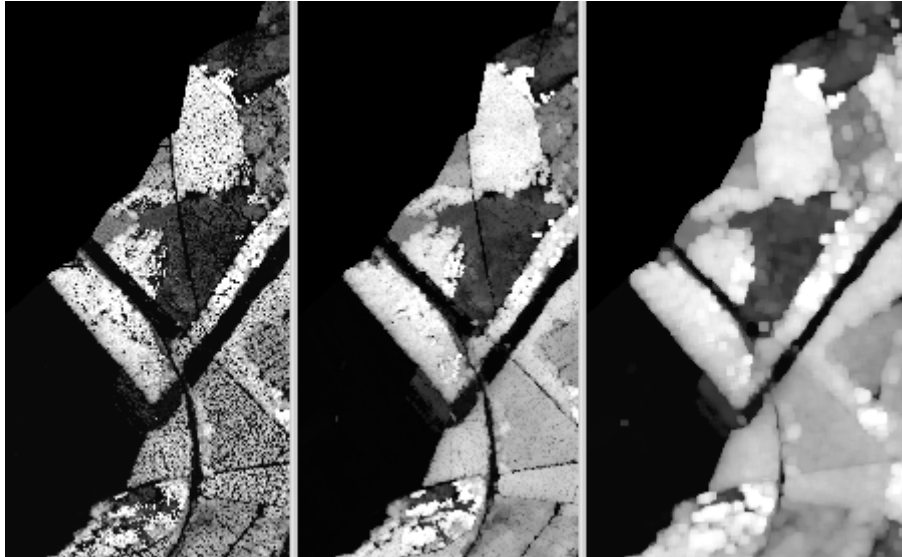
### Ableitung der Baumhöhe aus gerasterten Lidar-Daten

Bei der Rasterung der Lidardaten, also der Flächeninterpolation der unregelmäßig angeordneten Punkte auf ein regelmäßiges Gitter (verwendet wurde eine Gitterweite von  $1 \times 1 \text{ m}^2$ ), kommt es zwangsläufig zu leichten Veränderungen der Werte durch Resampling. Da die Punktdichte der Rohdaten höher als 1 Punkt pro  $\text{m}^2$  ist, wird bei den meisten Pixeln ein Mittelwert mehrerer Messpunkte gebildet. Dies führt zu einer Verstärkung der systematischen Unterschätzung, da Spitzen eingeebnet werden. Bei Verwendung der Rasterdaten ist also mit einer geringeren Genauigkeit der Baumhöhenschätzung gegenüber den Rohdaten zu rechnen. HYYPPÄ et al. (2008) und YU et al. (2004) schlagen vor, zur Erzeugung des DOM statt der normalen Interpolationsalgorithmen die jeweils höchsten Punkte einer Umgebung zu verwenden, und die restlichen Pixelwerte zu interpolieren, um die Einebnung der Spitzen zu verhindern.

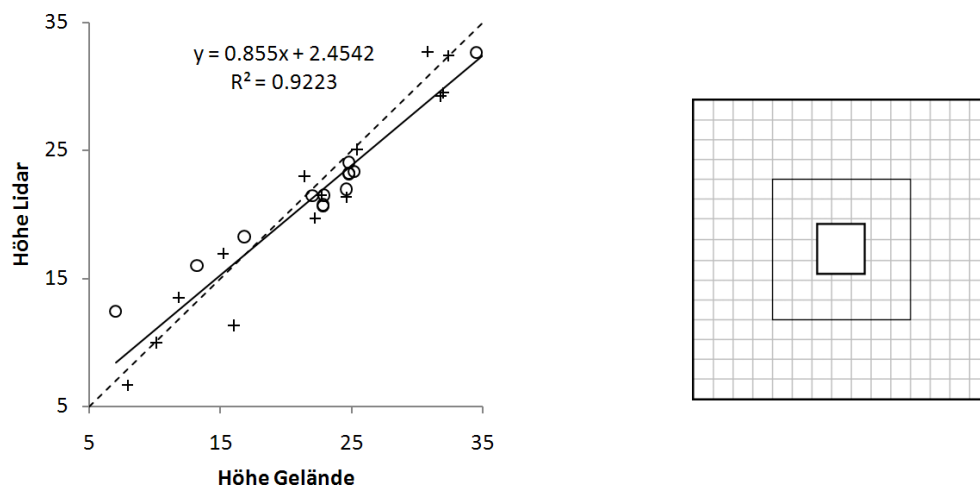
Um ein DOM ohne Einebnung der Baumspitzen zu erhalten, wurde aus den in Abschnitt 3.4.2 beschriebenen kleinen First/Only-Kacheln mit  $100 \text{ m} \times 100 \text{ m}$  Größe ein Bild mit  $0.5 \text{ m}$  breiten Pixeln erstellt, in dem jedes Pixel den maximalen Höhenwert in seiner Fläche erhielt. Pixel ohne Laserpunkte erhielten den Wert 0. Diese wurden anschließend mit den Werten des interpolierten First/Only-Bildes aufgefüllt.

Um aus diesem Bild wiederum einen flächendeckenden Baumhöhendatensatz herzustellen, der geglättet nicht die Höhe eines einzelnen Pixels, sondern die einer ganzen Baumkrone enthält, wurde das Bild im Ortsbereich tiefpassgefiltert und auf eine Pixelgröße von  $2 \text{ m}$  skaliert. Hierbei sollten allerdings die Konturen erhalten bleiben, insbesondere sollten die Grenzen niedriger Bestände sowie Wege und Straßen nicht scheinbar überwuchert werden. Zu diesem Zweck wurde ein Algorithmus für einen Zweizonenfilter entworfen, der im *Moving-Window-Verfahren* auf das Bild angewendet wurde (Abbildung 35). Zunächst wird in einem  $15 \text{ m} \times 15 \text{ m}$  großen Fenster das 97. Perzentil und in dem inneren  $7 \text{ m} \times 7 \text{ m}$  großen Fenster der Median bestimmt. Ist der innere Median deutlich kleiner als das 97. Perzentil des Fensters, gehört das betrachtete Pixel nicht zum geschlossenen Bestand und bekommt den Median als Wert zugewiesen. Ansonsten erhält das Pixel den Wert des 97. Perzentils. Das Ergebnis für einen Ausschnitt ist in Abbildung 34 zu sehen. Die im Gelände gemessenen Höhen werden bei Anwendung dieses Verfahrens mit einem Bestimmtheitsmaß von  $r^2 = 0.92$  bei einem RMSE von  $2.33 \text{ m}$  wiedergegeben (Abbildung 35). Die Werte liegen nah an der 1:1-Linie, sind also erwartungstreu. Eine Karte der mit dem beschriebenen Verfahren berechneten Baumhöhen für den gesamten Datensatz ist in Anhang D.1 abgedruckt.

Während NELSON (1997) einen Einfluss der Kronenform auf die lidarbasierte Baumhöhenmessung festgestellt hat, konnte in der vorliegenden Untersuchung dasselbe Verfahren mit vergleichbar guten Ergebnissen für Buchen und Fichten angewendet werden.



**Abbildung 34:** Effekt der Filterung des Höhendatensatzes. Links der ungefilterte Datensatz, rechts der mit einem normalen Tiefpassfilter bearbeitete. Bei dem mit 2-Zonenfilter hergestellten Bild in der Mitte sind die Konturen erhalten und die Höhen innerhalb der Bestände gleichmäßiger als im ungefilterten Bild.



**Abbildung 35:** Links: Aus Rasterdaten geschätzte und im Gelände gemessene Baumhöhen von Fichten (+) und Buchen (o). Rechts: 2-Zonen-Filter mit Kantenlängen 15 und 7 m sowie resultierendes 2m-Pixel.

## 4.2 Schätzung der Kronenlänge und der Kronenuntergrenze

Aus der Kronenlänge, also der Differenz der Baumhöhe und der Kronenuntergrenze, kann in Verbindung mit dem Kronendurchmesser das Volumen der Krone bestimmt werden. Die vertikale Ausdehnung der Kronenschicht ist nicht nur durch die individuelle Kronenlänge bestimmt, sondern auch durch die variierenden Baumhöhen im betrachteten Gebiet (KOETZ et al. 2006). Die Kronenlänge kann beispielsweise zur Abschätzung der Biomasse und des Photosynthesepotentials sowie zur Bestimmung der Feuergefahr in Wäldern verwendet werden (RIANO et al. 2003, POPESCU & ZHAO 2008). Die Höhe der Kronenuntergrenze ist im Gelände oft

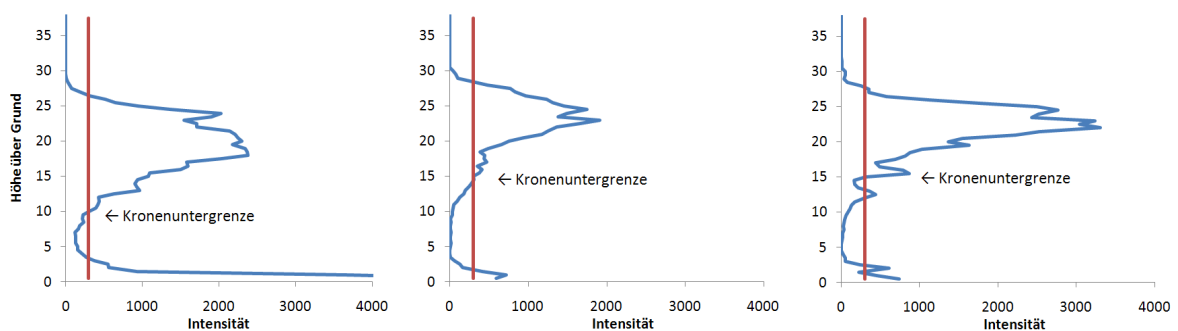
schwer zu bestimmen, da keine scharfe Grenze existiert. Bei den durchgeführten Geländemessungen wurden jeweils die untersten grün belaubten Äste, die zur Krone gehören, angepeilt.

Um die Kronenlänge aus Laserscannerdaten abzuleiten, wurde der in Voxel gerasterte Fullwave-Datensatz verwendet (siehe Abschnitt 3.5.3). Dabei wurde von der Hypothese ausgegangen, dass aus der gesamten Krone Laserechos zurückgeworfen werden. Aus dem Bereich zwischen Krone und Boden wird sehr wenig Energie zurückgestrahlt, so dass die Untergrenze an einer deutlichen Abnahme der reflektierten Energie zu erkennen ist (POPESCU & ZHAO 2008). Wenn eine Krone so dicht wird, dass ihre unteren Bereiche vom Laserstrahl nicht mehr erreicht werden bzw. die Echos aus den unteren Bereichen den Sensor nicht mehr erreichen, wird die Hypothese fehlerhaft.

Für jede Rasterzelle von  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  Größe wurde in der Wellenform nach dem Ende des oberen Peaks gesucht. Dafür wurde die Wellenform von oben her abgetastet, bis ein Schwellenwert überschritten war. Die Höhe, auf der dieser Schwellenwert wieder unterschritten wurde, wurde als Kronenuntergrenze abgespeichert. Komplexe Kronenformen können mit diesem Verfahren nicht erfasst werden, aber für die meisten Bestände konnte ein realistisches Ergebnis erzielt werden. Die Kronenlänge wurde durch Subtraktion der Kronenuntergrenze von der Baumhöhe errechnet. Für die 28 im Gelände vermessenen Bestände wurde eine Korrelation zwischen im Gelände gemessener Kronenlänge und aus den Lidar-Daten berechneter Kronenlänge von 0.73 erzielt. Dabei konnten die Kronenlängen der Buchen besser ( $r = 0.77$ ) geschätzt werden als die der Fichten ( $r = 0.69$ ).

Das Verfahren reagiert relativ sensibel auf Änderungen des Schwellenwertes. In Abbildung 36 ist zu erkennen, dass eine Änderung des Schwellenwertes (rote Linie) bei einigen Beständen zu einer deutlichen Änderung der geschätzten Kronenuntergrenze kommen würde; bei vielen Wellenformen bliebe die Untergrenze allerdings recht stabil.

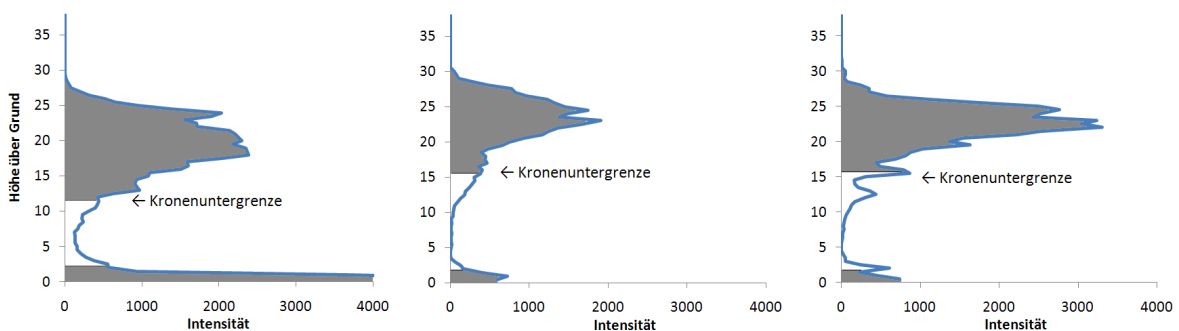
Eine alternative Strategie zur Bestimmung der Kronenuntergrenzen wird von RIAÑO et al. (2003) beschrieben. Sie bestimmen die Kronenuntergrenze als erstes Perzentil über 4 m Höhe in der Häufigkeitsverteilung von Einzelpunktdata in einer Zelle von  $10\text{ m} \times 10\text{ m}$ . Diese Methode wurde abgewandelt auf die Fullwave-Daten der vorliegenden Studie angewendet. Dabei wurde in den  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  großen Zellen der gerasterten Wellenformdaten jeweils das 10.



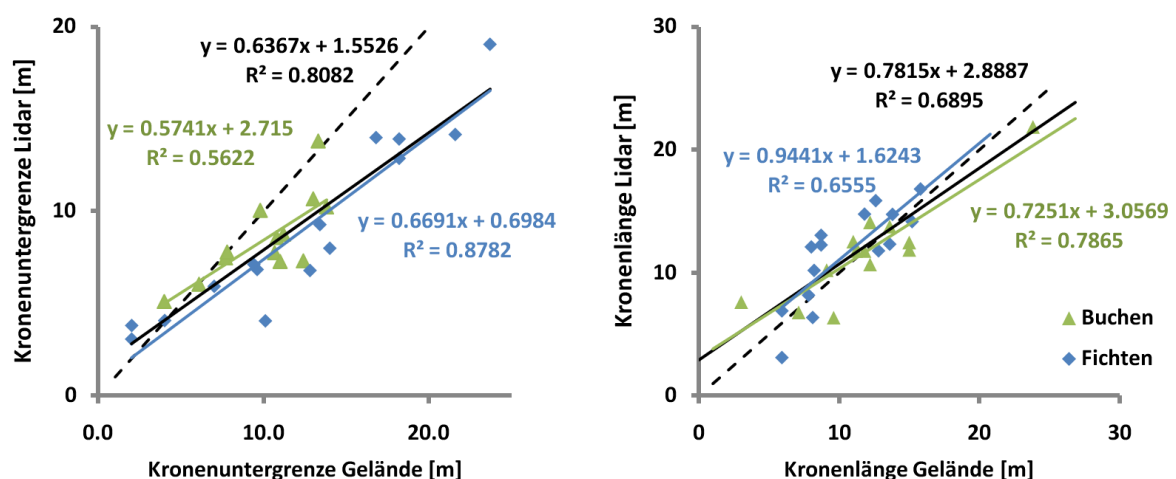
**Abbildung 36:** Aus Lidar-Daten bestimmte Kronenuntergrenzen

Perzentil der Energieverteilung oberhalb von 2 m Höhe bestimmt. Im Idarwald gibt es keinen vergleichbar hohen Unterwuchs wie in RIAÑOS Untersuchungsgebiet, aber relativ viele Jungbestände mit niedrigen Kronenuntergrenzen. Ein höheres Perzentil wurde gewählt, weil in der Wellenform meist auch unter der Krone noch ein Grundrauschen registriert wird. Das 10. Perzentil liegt bei den getesteten Wellenformen im Bereich des starken Energieabfalls unter der Krone (Abbildung 37). NÆSSET & ØKLAND (2002) verwendeten in einem ähnlichen Verfahren das 25. Perzentil von Einzelpunktdata, ohne Bodenreflexionen auszuschließen.

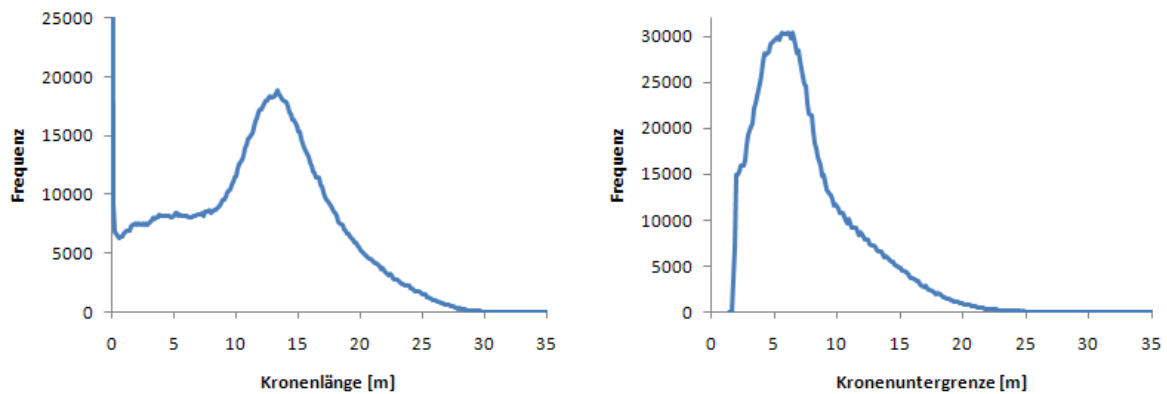
Die mit dem Verfahren nach RIAÑO et al. (2003) bestimmten Kronenuntergrenzen korrelieren mit den im Gelände gemessenen Untergrenzen bei den Fichten mit  $r = 0.94$ , bei den Buchen mit  $r = 0.75$  und bei beiden Baumarten gemeinsam mit  $r = 0.90$ . Die Kronenlänge, berechnet durch Subtraktion der Kronenuntergrenzen von den Baumhöhen, korreliert bei den Buchen mit  $r = 0.90$ , bei den Fichten mit  $r = 0.81$  und bei beiden Baumarten mit  $r = 0.83$  mit den entsprechenden Geländemessungen. Die entsprechenden Bestimmtheitsmaße und die Verteilung der Gelände- und Lidarwerte sind in Abbildung 38 zu finden. Hohe Untergrenzen von Fichtenkronen werden deutlich unterschätzt, eine Überschätzung der Untergrenzen gibt es nur bei sehr niedrigen Untergrenzen. Die Kronenlängen werden, abgesehen von der Streuung um die Geraden, erwartungstreu geschätzt.



**Abbildung 37:** Kronenuntergrenzen im Perzentil-basierten Verfahren. Der untere graue Bereich markiert die Unterwuchs-Schwelle, der obere graue Bereich enthält 90% der Fläche der restlichen Kurve.



**Abbildung 38:** Zusammenhang zwischen im Gelände gemessenen und mit Lidar geschätzten Kronenuntergrenzen und -längen. Die Messwerte und Regressionsgerade für Buchen sind grün, die für Fichten blau. Die Regressionsgerade und -gleichung für beide Baumarten ist schwarz dargestellt. Die 1:1-Linien sind gestrichelt abgebildet.



**Abbildung 39:** Histogramme der Kronenlängen und der Kronenuntergrenzen

Karten der Kronenlängen und der Kronenuntergrenzen, berechnet nach dem Verfahren nach RIAÑO et al. (2003), sind in Anhang D.2 dargestellt. Ein Problem dieses Verfahrens ist die Unterscheidung zwischen Unterwuchs und niedrigen Kronen. Bei Jungwuchs, dessen Kronen unterhalb der gesetzten Grenze von 2 m beginnen, wird die Kronenlänge systematisch unterschätzt. Dem Histogramm der Kronenuntergrenzen (Abbildung 39) ist zu entnehmen, dass Untergrenzen von weniger als 2 m abgeschnitten werden.

Statt eines physikalisch basierten Verfahrens, welches, wie die vorgestellten, die Kronenlänge direkt misst, kann sie auch mit statistischen Verfahren aus der Baumhöhe abgeleitet werden. Für die im Gelände erhobenen Daten besteht eine Korrelation zwischen Baumhöhe und Kronenlänge von 0.76, bei den Buchen sogar 0.91 (vgl. Abschnitt 2.2.4).

### 4.3 Schätzung der Stammzahl

Die Anzahl der Bäume pro Hektar ist eine der wichtigsten biophysikalischen Größen eines Baumbestands und bestimmt entscheidend die Biomasse und den Holzvorrat des Bestands mit. Im Gelände kann die Stammzahl durch Zählung der Bäume innerhalb einer abgesteckten Fläche ausreichender Größe ermittelt werden. Bei der Geländeuntersuchungen im Idarwald wurden Flächengrößen von 30 m × 30 m, bei sehr dichten Beständen 15 m × 15 m, verwendet. Fernerkundlich wurde die Stammzahl beispielsweise aus Orthophotos (z.B. ATZBERGER & SCHLERF 2002), aus flugzeuggestützten hochauflösenden multispektralen Scannerdaten (z.B. WULDER et al. 2000), aus hochauflösenden Satellitendaten (z.B. BUDDENBAUM & SEELING 2006) oder aus Satellitendaten mittlerer Auflösung (z.B. STOFFELS et al. 2007) abgeleitet.

Für die Zählung der Bäume pro Flächeneinheit muss zunächst festgelegt werden, ab welcher Größe ein Baum mitgezählt wird. Übliche Kriterien sind hier der Brusthöhendurchmesser und die Höhe des Baums. Der Brusthöhendurchmesser wird vor allem bei Geländeaufnahmen herangezogen, die Baumhöhe bei lidargestützten Untersuchungen. In der vorliegenden Auswertung wurden Bäume ab einer Höhe von 3 m berücksichtigt.

Die übliche Herangehensweise bei der Ableitung der Stammzahl aus Laserscannerdaten ist die Suche nach lokalen Maxima (HYYPÄ et al. 2008, MORSDORF et al. 2003, PERSSON 2002). Dabei können für die Auswertung von Lidardaten ähnliche Techniken wie bei hochauflösenden passiven Fernerkundungsdaten verwendet werden (HYYPÄ et al. 2008). Alternativ können die einzelnen Kronen im Laserscannerdatensatz segmentiert werden. HYYPÄ et al. (2001) und MALTAMO et al. (2004) beispielsweise konnten jeweils relativ lückige boreale Nadelwaldbestände segmentieren und über Zählung der Segmente die Stammzahl bestimmen. LEE & LUCAS (2007) bestimmten die Stammdichte in australischen Wäldern mit Laserscannerdaten aus einem höhenskalierten Offenheitsindex und erreichten hohe Übereinstimmungen mit Feldmessungen ( $r^2 = 0.81$ ).

Ein grundsätzliches Problem bei der Schätzung der Stammzahl aus Lidar-Daten ist, dass die einzelnen Kronen sich häufig überlappen, insbesondere bei Laubbäumen. Dadurch können mehrere benachbarte Bäume wie ein einzelner Baum erscheinen. Bei mehreren Schichten von Bäumen übereinander kann zudem meist nur die dominante Baumschicht erkannt werden (PERSSON 2002). Diese Gründe führen in der Regel zur Unterschätzung der tatsächlichen Stammzahl. Außerdem kann es, wenn auch seltener, vorkommen, dass eine einzelne Krone mehrere Höhenmaxima besitzt, was zur Überschätzung der Stammzahl führt. Sehr junge Bäume in der Etablierungsphase sind im Forst üblicherweise sehr eng gepflanzt. Selbst mit hochauflösenden Laserscanningdaten können die einzelnen Bäume nicht erkannt werden, so dass hier die Stammzahl systematisch unterschätzt wird.

Um ein möglichst genaues Abbild der Kronenoberflächen zu erhalten, wurde der Eingangsdatensatz zur Schätzung der Stammzahl folgendermaßen erzeugt: Die Pixelgröße für den Rasterdatensatz wurde auf  $0.5 \text{ m} \times 0.5 \text{ m}$  festgelegt. Da der Datensatz in Richtung SW-NE ausgerichtet ist, gibt es zahlreiche Pixel ohne Wert, wenn das Bild genordet dargestellt ist. Um die Anzahl der zu prozessierenden Pixel gering zu halten, wurde der Datensatz gegenüber der Nordrichtung um  $35^\circ$  gegen den Uhrzeigersinn rotiert. Aus dem First/Only-Punkt datensatz wurde für jedes Pixel die maximale Höhe als Pixelwert festgesetzt (anstatt eines Mittelwerts wie bei der gewöhnlichen räumlichen Interpolation). Pixel, in denen kein Laserpunkt vorlag, erhielten den Wert 0. Diese Lücken wurden in einem zweiten Schritt aus dem auf klassische Weise interpolierten Datensatz aufgefüllt. Das Ergebnis war also ein geringfügig rauherer Datensatz mit etwas höherem Mittelwert als der entsprechende konventionelle 0.5-m-First/Only-Datensatz. Von diesem Datensatz wurde das 0.5-m-Boden-Höhenmodell subtrahiert, und schließlich aus dem Differenzbild fehlerhafte Randpixel ausmaskiert.

Als Algorithmus zur Schätzung der Stammzahl wurde ein einfaches *Moving-Window*-Verfahren gewählt. Dabei wird davon ausgegangen, dass in einem räumlich hochaufgelösten Lidar-Datensatz jedes Höhenmaximum innerhalb einer Umgebung der ungefähren horizontalen Größe einer Baumkrone einer Baumspitze entspricht. Für jedes quadratische „Fenster“ im Datensatz wurde untersucht, ob das zentrale Pixel eine Baumspitze darstellt. Als Bedingung war dabei zu erfüllen dass das Zentralpixel den maximalen Höhenwert innerhalb seines Fensters besitzt und eine Höhe von über 3 m aufweist. Ein „Fenster“ ist hier eine quadratische

Region mit einer ungeraden Pixelzahl als Kantenlänge, die über alle Zeilen und Spalten um jeweils ein Pixel verschoben wird, bis das gesamte Bild abgedeckt ist.

Allgemein kann davon ausgegangen werden, dass mit zunehmendem Alter eines Bestands die Baumhöhe zunimmt und die Stammzahl abnimmt. Letzteres als Konsequenz von Durchforstungsmaßnahmen oder als Ergebnis der natürlichen Konkurrenzsituation, die dazu führt, dass dominante Bäume ihre schwächeren Nachbarn verdrängen. In Beständen mit großen Baumhöhen ist also mit niedrigeren Stammzahlen zu rechnen als in Beständen mit geringen Baumhöhen. Bei den Geländemessungen im Jahr 2005 wurden zwischen 122 und 5900 Bäume pro Hektar gezählt. Angesichts dieser hohen Varianz ist ersichtlich, dass eine einzige Fenstergröße der hohen Variabilität der Stammzahlen im Untersuchungsgebiet nicht gerecht werden kann.

Mehrere Fenstergrößen und Kombinationen von Fenstergrößen wurden getestet, um ein für das einfache Verfahren optimales Ergebnis zu erhalten. Dabei zeigte sich, dass bei festen Fenstergrößen Kantenlängen von 7 oder 9 Pixeln zu den besten Ergebnissen führten. Die Stammzahl von alten Beständen wurde mit einer Kantenlänge von 9 gut geschätzt, bei einer Kantenlänge von 7 aber überschätzt. Umgekehrt wurde bei einer Fensterbreite von 7 Pixeln die Stammzahl jüngerer Bestände gut geschätzt, die von alten Beständen aber überschätzt. Als Konsequenz wurden lokale Fenstergrößen in Abhängigkeit von der Bestandshöhe eingesetzt.

Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Das beste Ergebnis konnte mit einer Kombination von 5, 7, 9 und 11 Pixeln Kantenlänge erzielt werden. Für die Kombination unterschiedlicher Fenstergrößen wurde die maximale Baumhöhe im  $11 \times 11$  Pixel großen Ursprungsfenster ermittelt. Bei einer Höhe unter 25 m wurde das zentrale  $9 \times 9$  Pixel große Fenster weiterverwendet, bei einer Höhe unter 20 m das zentrale  $7 \times 7$ -Pixelfenster und bei einer Höhe unter 15 m die inneren  $5 \times 5$  Pixel. Abbildung 40 zeigt die gefundenen Baumspitzen auf einem nKM für einige unterschiedliche Bestände.

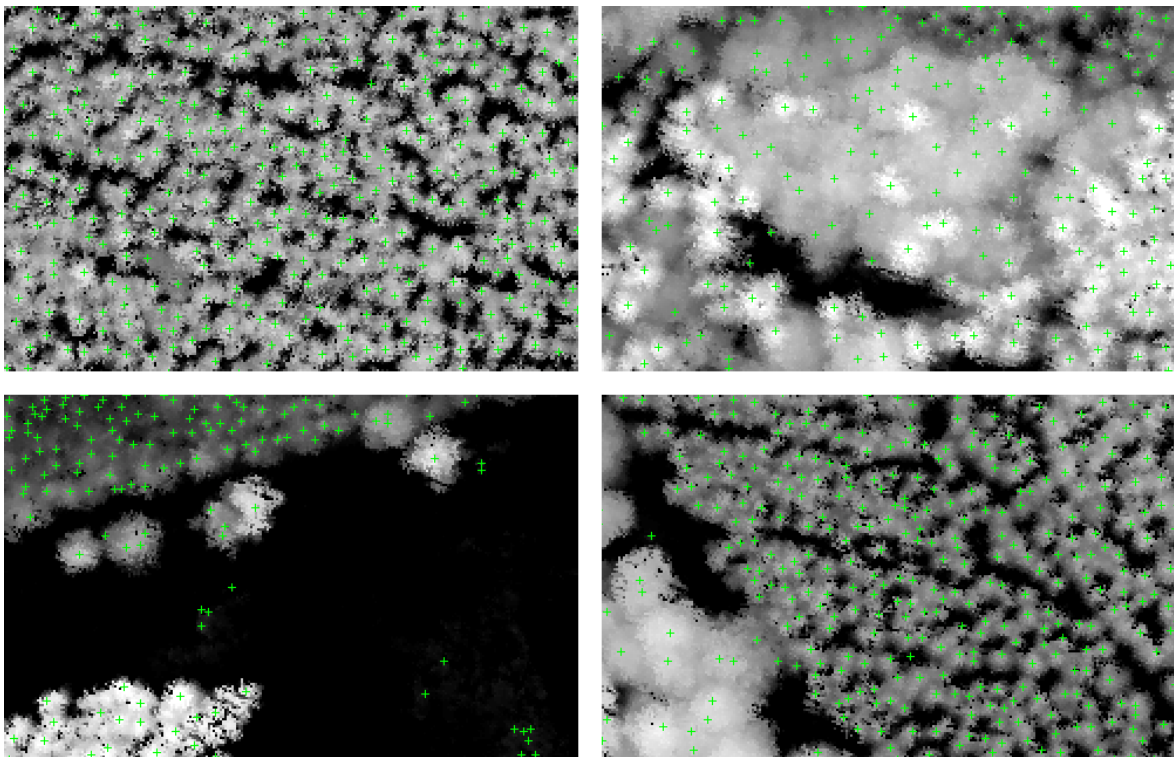
Da der hochaufgelöste Datensatz nicht auf einmal im Speicher des verwendeten Computers vorgehalten werden konnte, wurde das Verfahren inkrementell umgesetzt. Dabei wurden zunächst die ersten 11 Zeilen des Datensatzes eingelesen und das Fenster über diese Zeilen bewegt. Dann wurde die erste Zeile gelöscht und eine weitere eingelesen und verarbeitet. Das Ergebnis der aktuellen Zeile wurde direkt auf Festplatte geschrieben und nach jeder Zeile aus dem Hauptspeicher gelöscht. Dies wurde bis zum Ende des Bildes wiederholt, so dass beliebig große Bilder in annehmbarer Rechenzeit verarbeitet werden können. Für den vorliegenden Datensatz des Untersuchungsgebiets Morbach mit 9 841 Spalten und 25 591 Zeilen (ca. 1 GB Daten im Float-Format mit 4 Byte pro Pixel) dauerte die Berechnung knapp 3 Stunden.



**Tabelle 5:** Schätzungen der Stammzahl mit unterschiedlichen Fenstergrößen

Fenstergrößen	Korrelation zwischen Stammzahl aus Geländemessungen und Lidar-Daten
5	0.603***
7	0.756***
9	0.613***
11	0.434*
7 und 9	0.809***
7, 9 und 11	0.838***
5, 7 und 9	0.855***
5, 7, 9 und 11	0.869***

\*Signifikant mit  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$



**Abbildung 40:** Baumspitzen (grüne Kreuze) in vier unterschiedlichen Beständen.

## 4.4 Identifikation einzelner Bäume

Eng mit der Zählung der Bäume hängt die Identifikation einzelner Bäume zusammen. Bei der Identifikation wird entweder jedes Laserecho aus einer Krone einem Baum zugewiesen oder es werden die Grenzen zwischen den Bäumen gesucht.

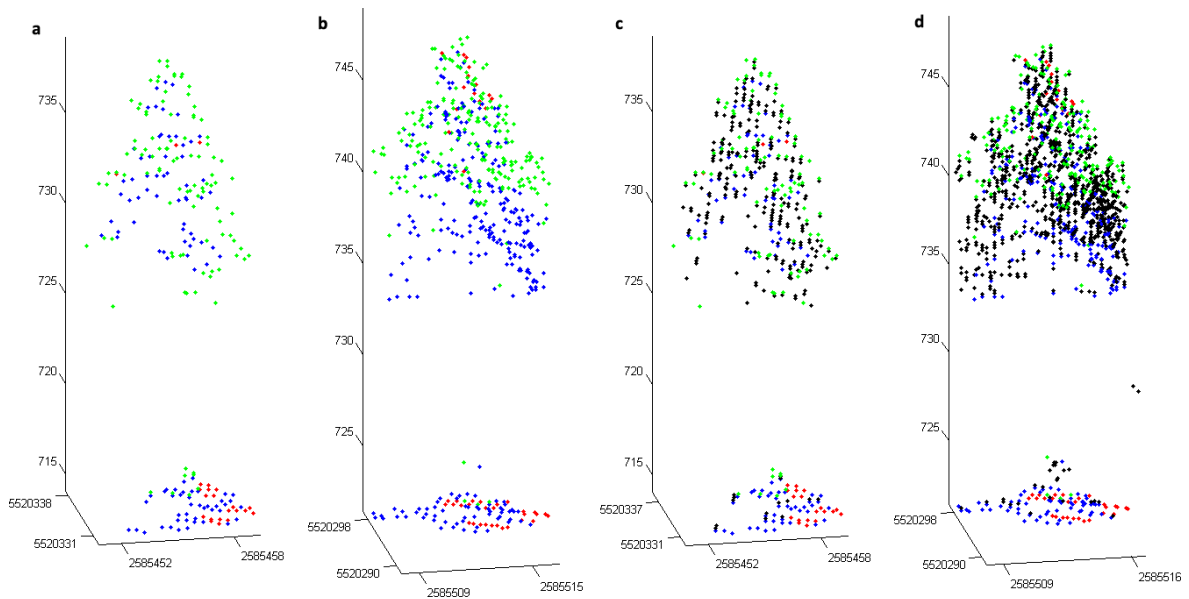
Um einzelne Bäume im Laserscannerdatensatz zu identifizieren, werden meist die „Gräben“ zwischen den Kronen entweder im Einzelpunkt datensatz oder im Oberflächenmodell gesucht. Hierfür wird entweder von den Baumspitzen ausgehend bis zu einer Maximaldistanz die nächste Einkerbung in jeder Richtung gesucht, oder es wird ein Algorithmus angewendet,

der im invertierten Datensatz Wasserscheiden ausfindig macht und somit Kronen wie Einzugsgebiete behandelt.

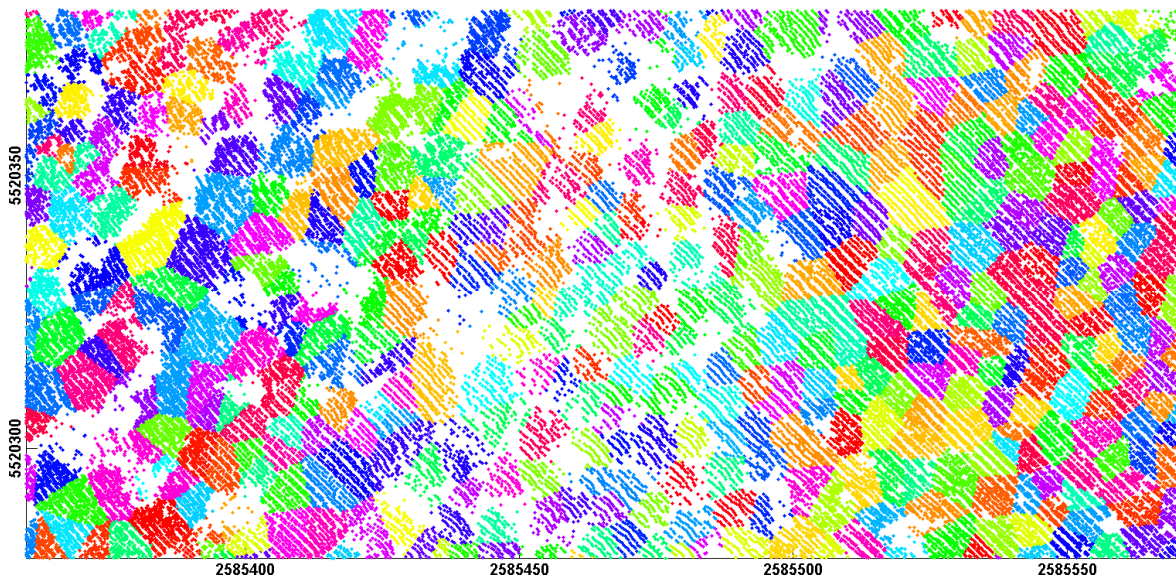
HYYPÄ et al. (2001) verwendeten einen *Region-growing*-Algorithmus, um ausgehend von den Baumspitzen Einzelbäume voneinander abzugrenzen. BRANDTBERG et al. (2003) segmentierten die Kronen einzelner unbelaubter Bäume mit einem *fuzzy* Verfahren, das die Zugehörigkeit von Laserpunkten zu bestimmten Kronen im Zentrum der Kronen mit höherer Sicherheit als im Rand- und Überlappungsbereich bestimmt. MORSDORF et al. (2004) setzten zur Identifikation der zu einzelnen Bäumen gehörenden Laserpunkte, dreidimensionales k-means-Clustering ein. Dabei werden die lokalen Maxima, also die Baumspitzen, als Startpunkte verwendet. KOUKOULAS & BLACKBURN (2005) nutzten Kontur-Erkennungsalgorithmen im Oberflächenmodell und in Farb-Infrarot-Luftbildern zur Delineation von einzelnen Kronen und Lücken zwischen Bäumen in einem Laubwald in Südengland. KOCH et al. (2006a & b) segmentierten Kronen nach einem Wasserscheiden-Algorithmus. Die entstehenden Polygone wurden durch Anwendung einiger Nachbearbeitungsalgorithmen zusammengefügt oder gespalten, bis plausible Kronenformen entstehen. Beispielsweise wurde eine Krone in mehrere aufgespalten, wenn sie mindestens zweieinhalb mal so lang wie breit war. SOLBERG et al. (2006) schlossen zunächst Punkte aus, die nicht aus dem obersten Kronenbereich stammen. Auf die gerasterten Daten wurde dann ein *Region-growing*-Algorithmus angewendet, der durch einige Zusatzregeln plausible Kronenformen erzeugte. REITBERGER et al. (2007a & b) verwendeten Fullwave-Laserscanning mit sehr hohen Pulsdichten von 25 pro m<sup>2</sup> im entlaubten Zustand, so dass sich im Ergebnisdatensatz die Baumstämme deutlich abzeichneten. Diese wurden dann ergänzend zu den Kronen zur Identifikation einzelner Bäume verwendet. Auch RAHMAN & GORTE (2008) identifizierten Stämme in Laserscannerdaten mit sehr hohen Punktdichten (70 m<sup>-2</sup>) und konnten dabei Einzelbäume von Unterwuchs trennen. ØRKA et al. (2009) wiesen Laserpunkte den Kronen zu, indem um die Baummittelpunkte Kreise mit im Feld gemessenen Radien gelegt werden. Die Punkte in Überlappungsbereichen wurden dabei dem höchsten beteiligten Baum zugewiesen.

Für das Untersuchungsgebiet Idarwald wurde zur Abgrenzung einzelner Kronen ein auf Einzelpunktdaten basierendes und ein auf gerasterten Bilddaten basierendes Verfahren getestet.

Um in den Punktwolken einzelne Bäume zu identifizieren wurde ein einfaches Verfahren entwickelt. Ausgangspunkt sind die Baumspitzen (vgl. Abschnitt 4.3). Für jeden Laserpunkt im untersuchten Gebiet wird die Baumspitze mit der geringsten horizontalen Distanz gesucht, und der Punkt diesem Baum zugewiesen. Um die einzelnen Bäume möglichst umfassend darzustellen, wurde dies außer mit den ersten, letzten und einzigen Punkten eines Pulses auch mit den Zwischenpunkten (*intermediate Pulses*, vgl. Abschnitt 3.5.4) durchgeführt. Abbildung 41 zeigt die Kronen zweier auf diese Weise identifizierter Bäume, einmal mit und einmal ohne *intermediate Pulses*. Abbildung 42 stellt für ein Teilgebiet eine Karte der Einzelbäume dar. Jedem Baum ist eine zufällige Farbe zugewiesen, daher kann es vereinzelt dazu kommen, dass zwei benachbarte Kronen dieselbe Farbe haben.



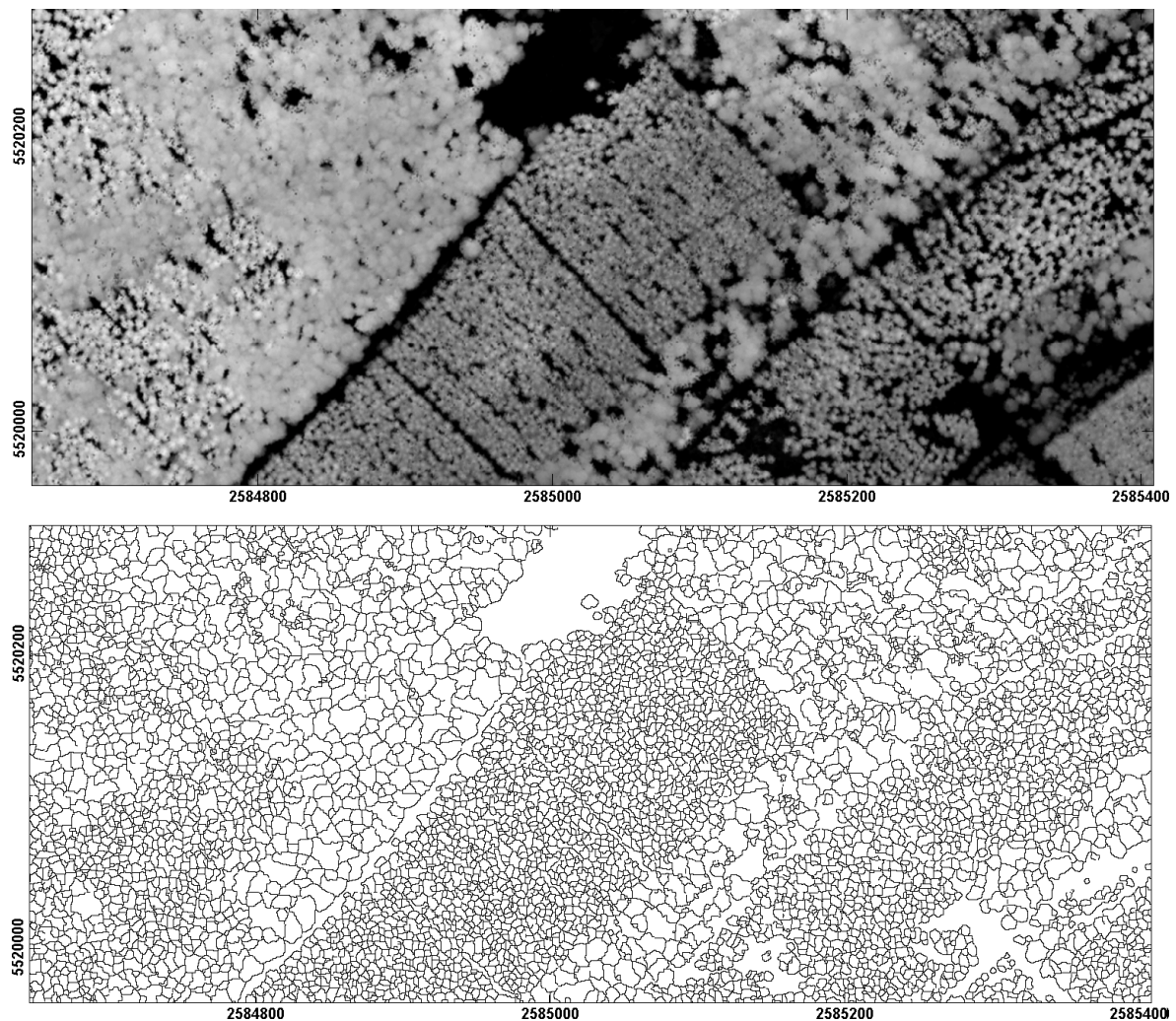
**Abbildung 41:** Laserpunkte zweier einzelner Bäume im Wald. *First Pulses* sind grün, *Last Pulses* blau und *Only Pulses* rot dargestellt. In c und d sind dieselben Bäume außerdem mit *Intermediate Pulses* (schwarz) dargestellt.



**Abbildung 42:** Karte der zu einzelnen Kronen gehörenden Laserpunkte (nur *First Pulse*).

Alternativ zum oben dargestellten Ansatz, der auf Einzelpunkten basiert, wurde mit dem DOM mit 0.5 m Auflösung als Eingangsdatensatz ein Watershed-Algorithmus als pixelbasiertes Verfahren getestet. Das invertierte Oberflächenmodell wurde zunächst mit einem Tiefpassfilter ( $3 \times 3$  Pixel) geglättet und dann mit dem in Matlab implementierten Watershed-Algorithmus segmentiert (MATHWORKS 2008). Der Algorithmus identifiziert im Höhenmodell diejenigen Pixel, aus denen Wasser in unterschiedliche Richtungen fließen könnte und kennzeichnet dieses als Wasserscheidenpixel. Die Pixel dazwischen, bei denen die Fließrichtung eindeutig ist, werden als zusammengehörende Einzugsgebiete angesehen. Jedes Einzugsgebiet erhält eine Nummer, die den Pixeln im Gebiet zugewiesen wird. Lokale Minima von weniger als einem halben Meter Tiefe gegenüber der Umgebung wurden dabei ausgeschlossen, um eine Übersegmentierung der Flächen zu vermeiden. Vor der Segmentierung wurden

baumfreie Flächen mit Höhen von weniger als 2 m über Grund mit der Höhe minus unendlich ausgezeichnet, was dazu führt, dass diese Flächen nicht segmentiert werden. Abbildung 43 zeigt das Segmentierungsergebnis für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebiets mit unterschiedlich hohen Bäumen und einigen Freiflächen. Das Ergebnis variiert deutlich, wenn die Parameter für lokale Minima und Freiflächen geändert werden. Hier muss ein Kompromiss zwischen Hersteller- und Nutzergenauigkeit gefunden werden. Zu wenig Glättung führt dazu, dass ein großer Anteil der Bäume gefunden wird, es werden aber auch viele nichtexistente Bäume ausgewiesen. Bei zu starker Glättung ist es umgekehrt: Viele existierende Bäume werden nicht erkannt (SOLBERG et al. 2006). Bei dem in Abbildung 43 dargestellten Ergebnis sind vor allem in Laubwaldgebieten einige Kronen zu groß und müssten noch stärker segmentiert werden.



**Abbildung 43:** Digitales Oberflächenmodell eines Bildausschnitts (oben) und mit Watershed-Algorithmus segmentierte Kronen (unten).

## 4.5 Schätzung des Bestandslückenanteils

Der Bestandslückenanteil (*Gap Fraction*) gibt an, wie viel Licht ungehindert durch Lücken im Blätterdach senkrecht bis zum Boden durchdringt. Der umgekehrte Wert ist der Kronenschlußgrad (*Canopy Closure*) bzw. der Bedeckungsgrad (*Fractional Cover*) oder Überschirmungsgrad. BARET et al. (1995) geben einen Überblick über Verfahren, den Lückenanteil aus passiven optischen Fernerkundungsdaten wie Landsat TM oder NOAA AVHRR zu schätzen. NILSON & KUUSK (2004) und CHEN & CIHLAR (1996) stellen eine Methode vor, den Lückenanteil aus LAI-Messungen mit dem LiCor LAI 2000 Plant Canopy Analyzer abzuleiten. Aus Laserscannerdaten wird der Lückenanteil üblicherweise über den Anteil der Laserpunkte oder der zurückgestreuten Energie unter dem Bestand an den gesamten Punkten oder der gesamten empfangenen Energie bestimmt (SOLBERG et al. 2006, MORSDORF et al. 2006, HOPKINSON & CHASMER 2009). Es wird also die Tatsache in Wert gesetzt, dass bei einem lückigen Bestand mehr Punkte den Boden erreichen als bei einem geschlossenen Bestand.

RIAÑO et al. (2004) nutzten hemisphärische Fotos und Lidardaten, um den Lückenanteil zu messen. Sie definieren die *Gap Fraction*  $G$  für den Zenitwinkel  $\theta$  nach dem Lambert-Beerschen Gesetz als

$$G(\theta) = e^{-K(\theta) \cdot LAI_e}, \quad (4-1)$$

wobei  $K(\theta)$  der Extinktionskoeffizient in Abhängigkeit des Zenitwinkels ist und  $LAI_e$  der effektive Blattflächenindex, der die nichtzufällige Verteilung der Blätter nicht berücksichtigt und auch die Abschattung durch Äste und Stämme beinhaltet. *Ground Cover* wird als vertikal projizierte Bestandsfläche pro Grundfläche ebenfalls nach dem Lambert-Beerschen Gesetz definiert, wobei von einer ellipsoidalen Verteilung der Blätter ausgegangen wird:

$$GndCover = 1 - e^{-K(x,0) \cdot LAI_e}. \quad (4-2)$$

$K(x,0)$  ist hier der Extinktionskoeffizient für einen Zenitwinkel von  $0^\circ$  und  $x$  die ellipsoidale Blattwinkelverteilungsfunktion.

HOPKINSON & CHASMER (2009) vergleichen vier Methoden, den Bedeckungsgrad (*Fractional Cover*,  $FC$ ) bzw. die *Gap Fraction*  $G$  aus Laserscannerdaten zu bestimmen. Sie definieren

$$1 - FC = G = T = \frac{I_l}{I_0} = e^{-k \cdot LAI_e}, \quad (4-3)$$

wobei  $T$  die Transmissivität des Bestandes ist,  $I_0$  die Lichtintensität über dem Bestand und  $I_l$  die Lichtintensität nach Durchgang eines Wegs der Länge  $l$  durch den Bestand.

In der vorliegenden Arbeit wurden diese vier Methoden für das Untersuchungsgebiet Idarwald berechnet, die Ergebnisse sind als Karten in Anhang D dargestellt. Den Methoden liegen jeweils leicht unterschiedliche Überlegungen zugrunde. Beim Modell *All Return Ratio* ( $FC_{Li-dar(RR)}$ ) wird die Anzahl der Laserechos aus dem Bestand zur Anzahl aller Laserechos im betrachteten Flächensegment ins Verhältnis gesetzt:

$$FC_{\text{Lidar(RR)}} = \frac{\sum R_{\text{Canopy(All)}}}{\sum R_{\text{Total(All)}}}. \quad (4-4)$$

Das zweite vorgestellte Modell verwendet nur die First Pulses. MORSDORF et al. (2006) konnten mit dem bei HOPKINSON & CHASMER (2009) *First Return Ratio* ( $FC_{\text{Lidar(FR)}}$ ) genannten Verfahren die bessere Ergebnisse erzielen:

$$FC_{\text{Lidar(FR)}} = \frac{\sum R_{\text{Canopy(First)}}}{\sum R_{\text{Total(First)}}}. \quad (4-5)$$

Wenn nicht nur die Anzahl der Echos, sondern auch deren Intensität zur Verfügung stehen, kann der Bedeckungsgrad aus dem Verhältnis der Rückstreuintensität im Bestand zur gesamten Intensität (*Intensity Ratio*,  $FC_{\text{Lidar(IR)}}$ ) berechnet werden:

$$FC_{\text{Lidar(IR)}} = \frac{\sum I_{\text{Canopy}}}{\sum I_{\text{Total}}}. \quad (4-6)$$

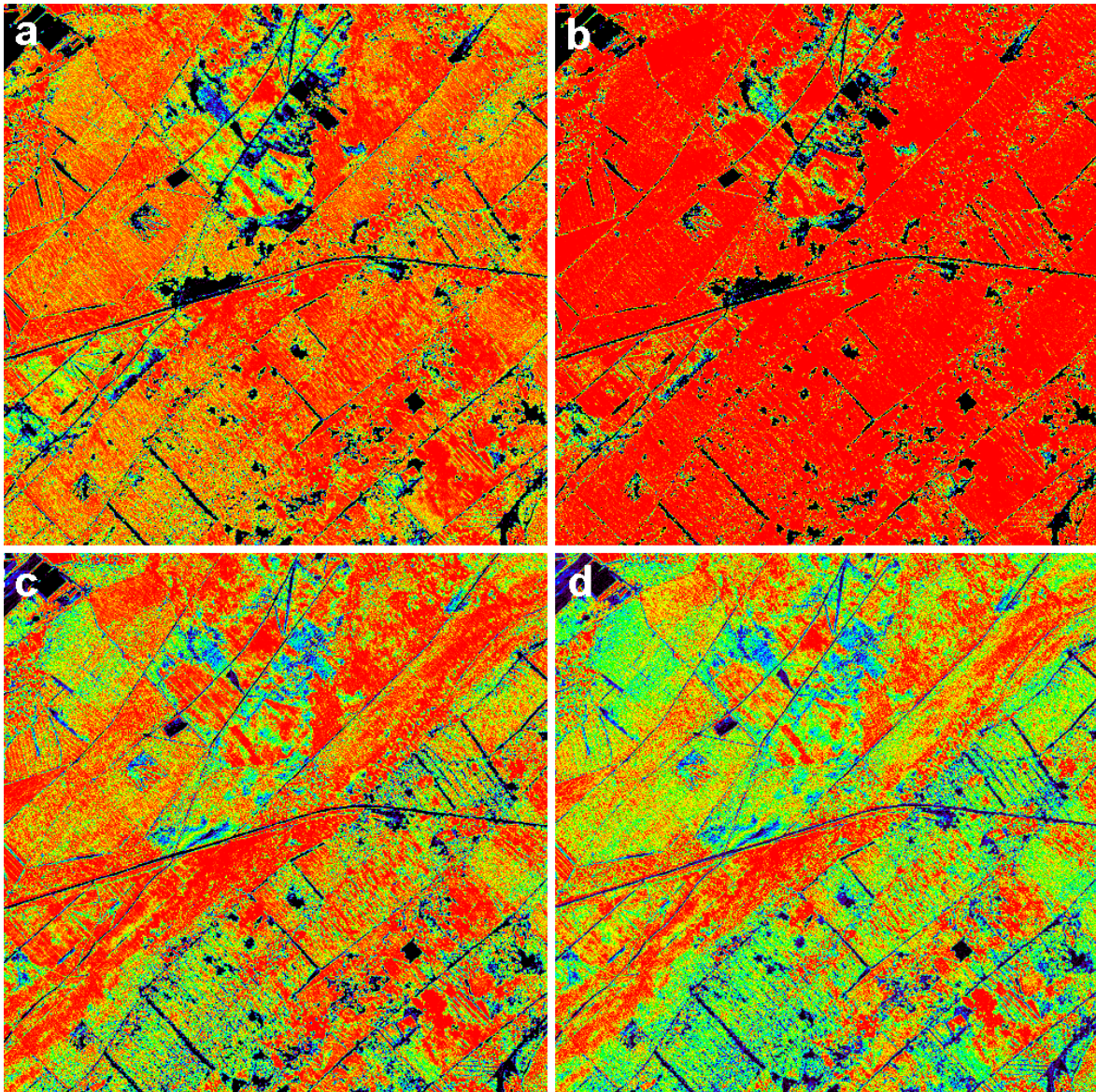
Eine Einschränkung dieser Berechnungsmethode ist, dass die unterschiedliche Wahrscheinlichkeit, ein Signal aus dem Bestand oder vom Boden zu empfangen, nicht berücksichtigt wird. *First Pulses* haben mit großer Wahrscheinlichkeit keinen Transmissionsverlust durch vorherigen Kontakt mit Oberflächen erfahren, *Intermediate* und *Last Pulses* aber schon. Diese sind ein reflektierter Anteil von Restenergie, die nach einem vorherigen Kontakt übrig ist. Wenn gemäß Lambert-Beerschem Gesetz von gleichmäßiger Extinktion der Strahlung auf dem Weg nach unten ausgegangen wird, muß auch die entsprechende Extinktion der Strahlungsenergie nach Reflexion am Boden angenommen werden. Die Rückstreuintensität ist vor allem von der Größe der reflektierenden Fläche abhängig (vgl. Abschnitt 3.2.3). Wenn beispielsweise in einem Bestand mit 40 % Bedeckungsgrad 60 % der ausgestrahlten Energie den Boden erreicht, wird das Bodensignal nach Verlassen des Bestands noch  $60\% \times 60\% = 36\%$  der ursprünglichen Intensität haben. Um diesem zweimaligen Energieverlust Rechnung zu tragen, kann die Quadratwurzel des Verhältnisses der vom Boden gemessenen Intensität zur gesamten Intensität des empfangenen Laserstrahls als Maß der Transmissivität des Bestands verwendet werden:

$$FC_{\text{Lidar(IR-2way)}} = 1 - \sqrt{\frac{\sum I_{\text{Ground}}}{\sum I_{\text{Total}}}}. \quad (4-7)$$

Um nun noch die unterschiedlichen Transmissionsverluste der Echotypen (*First*, *Intermediate*, *Last* und *Only*) zu berücksichtigen, kombinieren HOPKINSON & CHASMER (2009) die den Gleichungen (4-6) und (4-7) zugrundeliegenden Gedanken zu

$$FC_{\text{Lidar(BL)}} = 1 - \left( \frac{\left( \frac{\sum I_{\text{GroundSingle}}}{\sum I_{\text{Total}}} \right) + \sqrt{\frac{\sum I_{\text{GroundLast}}}{\sum I_{\text{Total}}}}}{\left( \frac{\sum I_{\text{First}} + \sum I_{\text{Single}}}{\sum I_{\text{Total}}} \right) + \sqrt{\frac{\sum I_{\text{Intermediate}} + \sum I_{\text{Last}}}{\sum I_{\text{Total}}}}} \right), \quad (4-8)$$

wobei BL für *Beer's Law* steht und die Indizes die unterschiedlichen Echotypen angeben. Mit  $FC_{\text{Lidar(BL)}}$  werden für sieben Laserscanningdatensätze in unterschiedlichen kanadischen Ökozonen mit unterschiedlichen Befliegungskonfigurationen gute Schätzungen des Bedeckungs-



**Abbildung 44:** Ausschnitt der vier Fractional-Cover-Modelle in Falschfarbdarstellung (rot = hoher Kronenschlussgrad, grün/blau = niedriger Kronenschlussgrad). a: FCLidarRR, b: FCLidarFR, c: FCLidarIR, d: FCLidarBL.

grads (Bestimmtheitsmaß von 0.75 gegen Schätzungen aus hemisphärischen Photographien) erreicht, ohne dass Kalibrierungen notwendig waren. Die Beziehungen zu den Referenzdaten für  $FC_{\text{Lidar}(\text{BL})}$  sind linear mit Steigungen nahe 1 und Achsenabschnitten nahe 0.

Da die gelieferten Punktdaten nicht die notwendige Differenzierung der Echotypen aufweisen, wurden zur Berechnung der *Fractional-Cover-Modelle* die in Abschnitt 3.5.4 beschriebenen aus *Full-Waveform*-Daten extrahierten eigenen Punktdatensätze verwendet. Abbildung 44 zeigt einen Ausschnitt der vier Ergebniskarten. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Differenzierung zwischen unterschiedlichen Beständen von  $FC_{\text{Lidar}(\text{FR})}$  über  $FC_{\text{Lidar}(\text{RR})}$  und  $FC_{\text{Lidar}(\text{IR})}$  bis  $FC_{\text{Lidar}(\text{BL})}$  zunimmt.

LEFSKY et al. (1999b) haben den Bedeckungsgrad von Waldbeständen mit Hilfe von Large-Footprint Full-Waveform-Daten des Laserscanners SLICER bestimmt. Sie berechnen

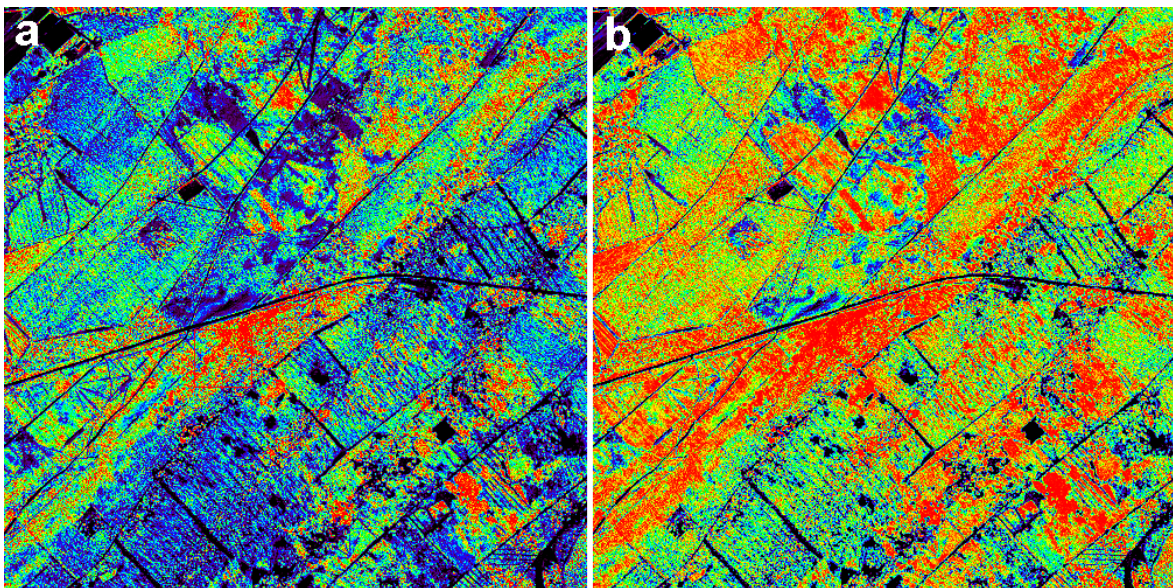
$$Cover = 1 - \frac{K \cdot GroundReturn}{CanopyReturn + K \cdot GroundReturn}, \quad (4-9)$$

wobei *GroundReturn* und *CanopyReturn* die Summe der Intensität vom Boden und aus dem Bestand sind, und damit  $\sum I_{Ground}$  und  $\sum I_{Canopy}$  nach HOPKINSON & CHASMER (2009) entsprechen. *K* ist ein Faktor, der die unterschiedliche Albedo von Boden und Blättern ausgleichen soll. LEFSKY et al. (1999b) setzen den Faktor für SLICER, der mit einer Wellenlänge von 1064 nm arbeitet, auf 2.0. In der Wellenlänge des Riegl LMS-Q560, 1550 nm, ist der Reflexionsgrad von Böden meistens höher als der von Blättern, so dass ein Faktor kleiner als 1 angemessen scheint. Um das Ergebnis von LEFSKY et al. (1999b) zu reproduzieren und um die Abhängigkeit der Schätzung von *K* genauer zu untersuchen, wurde *Cover* auch mit *K*=2 und *K*=4 berechnet. Trotz des bei der verwendeten Wellenlänge umgekehrten Verhältnisses der Reflexion von Boden und Blättern zueinander führte dies zu einer besseren Schätzung des Bedeckungsgrades. Als weitere Berechnungsmethode wurden noch Gleichungen (4-7) und (4-9) mit *K*=2 und *K*=4 kombiniert zu

$$Cover_{2way} = 1 - \sqrt{\frac{K \cdot GroundReturn}{CanopyReturn + K \cdot GroundReturn}}. \quad (4-10)$$

Abbildung 45 zeigt die Ergebnisse zweier Schätzungen nach LEFSKY et al. (1999b) im gleichen Bildausschnitt wie Abbildung 44.

Als Genauigkeitsabschätzung der Bedeckungsgradmodelle wurden die Ergebnisse mit den bei der Geländekampagne (vgl. Abschnitt 2.2.4) aufgenommenen Werten verglichen. Als Vergleichswert kommen mehrere Größen in Frage:



**Abbildung 45:** Fractional-Cover-Modelle nach LEFSKY et al. (1999b). a:  $Cover_{2-way}(K=4)$ , b:  $Cover(K=2)$ .



- Der mit dem LiCor Plant Canopy Analyzer gemessene effektive LAI
- Der mit dem Plant Canopy Analyzer gemessene Lückenanteil in den zentralen Ringen
- Der visuell geschätzte Kronenschlussgrad und
- Der aus den hemisphärischen Fotos abgeleitete Kronenschlussgrad.

HOPKINSON & CHASMER (2009) validieren ihre Lidar-gestützten Schätzungen des Kronenschlussgrads mit Werten aus hemisphärischen Fotos. Bei der Auswertung der Fotos gehen sie ähnlich vor, wie der LiCor Plant Canopy Analyzer: Es werden 9 konzentrische Ringe über das Bild gelegt und der Anteil von Vegetation und Himmel in jedem Ring bestimmt. Die Lidar-gestützten Schätzungen werden dann jeweils zum Bedeckungsgrad im zentralen Ring, in den beiden inneren Ringen und so weiter bis zum Bedeckungsgrad im ganzen Foto in Beziehung gesetzt. Die besten Übereinstimmungen werden bei Berücksichtigung von Abweichungen vom Zenit bis ca. 18° erzielt. Um auch in der vorliegenden Arbeit die größere Aussagekraft zenitnaher Beobachtungen zu untersuchen, wurde der LiCor-Lückenanteil für die zentralen Ringe gesondert mit den aus Lidar abgeleiteten Werten verglichen. Dabei wird jeweils eine lineare Beziehung zwischen den im Gelände gemessenen und den fernerkundlich abgeleiteten Werten angenommen. Die Ergebnisse der Genauigkeitsabschätzung können Tabelle 6 entnommen werden. Als Kennwert dient jeweils das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression  $R^2$ .

$FC_{Lidar(BL)}$  zeigt unter den Modellen nach HOPKINSON & CHASMER (2009) die beste Übereinstimmung mit den Referenzdaten. Mit *Gaussfrac*, dem aus den hemisphärischen Fotos unter erhöhter Gewichtung der zentralen Pixel gewonnenen Bedeckungsgrad, als Vergleichsgröße lässt sich genau das auch von HOPKINSON & CHASMER (2009) erreichte Bestimmtheitsmaß von 0.75 erreichen. Auch der visuell abgeschätzte Kronenschlussgrad und die in maximal drei

**Tabelle 6:** Genauigkeitsabschätzung ( $R^2$ ) der vier Fractional-Cover-Modelle mit Hilfe verschiedener Geländemessungen. Zellen mit  $R^2 \geq 0.75$  sind grau hinterlegt.

	Gaussfrac <sup>1</sup>	vis. KS <sup>2</sup>	LAI <sup>3</sup>	LiCor Ring 1 <sup>4</sup>	LiCor Ringe 1-2	LiCor Ringe 1-3
$FC_{Lidar(RR)}$	0.176*	0.051	0.002	0.034	0.026	0.024
$FC_{Lidar(FR)}$	0.028	0.004	0.045	0.005	0.014	0.016
$FC_{Lidar(IR)}$	0.549***	0.520***	0.236**	0.528***	0.532***	0.501***
$FC_{Lidar(BL)}$	0.752***	0.705***	0.370***	0.617***	0.648***	0.626***
$Cover_{(K=0.5)}$	0.424***	0.465***	0.562***	0.542***	0.501***	0.462***
$Cover_{(K=2)}$	0.634***	0.665***	0.714***	0.731***	0.698***	0.654***
$Cover_{(K=4)}$	0.711***	0.731***	0.734***	0.766***	0.739***	0.695***
$Cover_{2-way(K=2)}$	0.785***	0.766***	0.715***	0.750***	0.729***	0.688***
$Cover_{2-way(K=4)}$	0.810***	0.775***	0.690***	0.731***	0.714***	0.675***

<sup>1</sup>Bedeckungsgrad aus hemisphärischen Fotos mit Normalverteilungsgewichtung.

<sup>2</sup>Visuell im Gelände geschätzter Kronenschlussgrad.

<sup>3</sup>LAI laut LiCor Plant Canopy Analyzer.

<sup>4</sup>Gap Fraction im zentralen Ring / in den zentralen Ringen laut Plant Canopy Analyzer.

\*Signifikant mit  $p < 0.05$ , \*\*  $p < 0.01$ , \*\*\*  $p < 0.001$

zentralen Ringen gemessene Gap Fraction laut Plant Canopy Analyzer erweisen sich als geeignete Vergleichsgrößen zum fernerkundlich abgeleiteten Kronenschlussgrad. Sehr viel schwächere Zusammenhänge bestehen zwischen den Geländewerten und den Modellen  $FC_{Lidar(RR)}$  und  $FC_{Lidar(FR)}$ , die nur die Punktdichte, aber nicht die Rückstreuintensität berücksichtigen. Hier konnten die deutlich besseren Ergebnisse von HOPKINSON & CHASMER (2009) und MORSDORF et al. (2006) nicht reproduziert werden.

Unter den Modellen nach LEFSKY et al. (1999b) und den modifizierten Modellen nach Gleichung (4-10) ergeben sich die höchsten Übereinstimmungen mit *Gaussfrac* bei sehr hohen Werten für den Parameter  $K$  und Anwendung der modifizierten Gleichung (4-10). Die hohen Werte für  $K$  lassen sich bei der verwendeten Wellenlänge nicht aus dem Albedounterschied von Blättern und Boden erklären, aber damit, dass die meisten Pulse bei Erreichung des Bodens bereits einen Teil ihrer Energie durch Reflexion und Absorption an Blättern verloren haben, und die Reflexion am Boden zum Ausgleich höher gewichtet wird.

## 4.6 Schätzung des Blattflächenindex

Der Blattflächenindex (LAI, *Leaf Area Index*), die einseitige Blattfläche pro Bodenfläche, ist eine Schlüsselgröße in der Beschreibung und Modellierung von Ökosystemen (GOWER et al. 1999, RIAÑO et al. 2004). Die Blattoberflächen eines Waldbestands sind dessen größte und wichtigste Grenzfläche, die den Austausch von Masse, Energie und Gasen zwischen der photosynthetisch aktiven Vegetation und der Atmosphäre bestimmt (VERGER et al. 2009). Daher ist der LAI auch ein wichtiger Parameter in ökophysiologischen, biogeochemischen und klimatologischen Modellen sowie für die Abschätzung der Photosynthese und Evapotranspiration von Beständen (CHEN & CIHLAR 1996, WEISS et al. 2004, JENSEN et al. 2008).

Direkte Messungen des LAI bestehen im kompletten Abernten der Blätter zur Bestimmung ihrer Fläche. Die ist bei landwirtschaftlichen Kulturen aufwendig, aber möglich, bei Forstbeständen jedoch nicht mehr. Beim Laubbäumen können auch die im Herbst abgeworfenen Blätter gesammelt und vermessen werden (JONCKHEERE et al. 2004). Zerstörungsfreie, indirekte Messungen vor Ort verwenden ein Messgerät, das die Transmissivität des Bestandes aufzeichnet und den LAI unter Annahme einer zufälligen Blattverteilung berechnet (GOWER et al. 1999, JONCKHEERE et al. 2004). Das bekannteste dieser Messgeräte ist der LiCor LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (vgl. Abschnitt 2.2.4).

Auf größeren Skalen wird der LAI häufig mit passiven Fernerkundungssensoren gemessen, beispielsweise über eine Beziehung zu einem Vegetationsindex (RIAÑO et al. 2004). Ein Problem bei diesen Messungen ist, dass bei hohen Blattflächenindizes die Werte von LAI-Messungen mit passiven Sensoren schnell aufsättigen (JENSEN et al. 2008) oder sogar negative Beziehungen auftreten (SOLBERG et al. 2009) und dass Bodenvegetation dem Signal einen starken Rauschanteil aufprägen kann (CHEN & CIHLAR 1996). LAI-Schätzungen mit passiven Sensoren sind daher vor allem für regionale oder globale Betrachtungen geeignet (RIAÑO et al. 2004, VERGER et al. 2009). Luftgestütztes Laserscanning kann die Lücke zwischen kleinräumigen, punktuellen Messungen vor Ort und makroskaligen Messungen per Satellit schließen, da

eine hohe räumliche Auflösung zur Verfügung steht, Störeinflüsse durch Bodenvegetation minimiert werden können und weil Lidar nicht bei hohen LAI-Werten aufsättigt (LEFSKY et al. 2002).

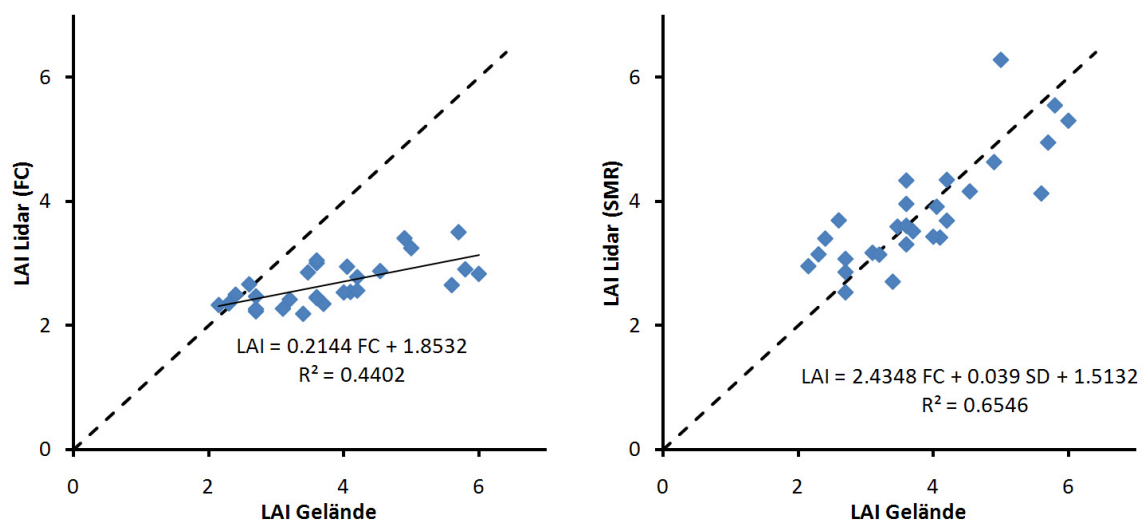
Laut HOULDCROFT et al. (2005) und SOLBERG et al. (2009) kann der effektive LAI aus der *Gap Fraction* nach

$$LAI = \frac{\ln(P_0)}{-G} \quad (4-11)$$

berechnet werden, wobei die Gap Fraction als  $P_0$  bezeichnet wird.  $G$  ist der Anteil der projizierten Fläche der Blätter an ihrer Gesamtfläche. Unter der Annahme dass die Blätter in jede Richtung mit gleicher Wahrscheinlichkeit ausgerichtet sind, hat  $G$  den Wert 0.5.

Unter dieser Annahme wurde aus den Lidar-Daten ein flächendeckendes LAI-Bild berechnet. Der Bedeckungsgrad wurde dabei aus  $Cover_{2-way(K=4)}$  berechnet. Dieses Maß hat zwar eine hohe Korrelation zu den geländebasierten Messungen, aber Steigung und Achsenabschnitt der linearen Regression sind relativ weit von den gewünschten Werten 1 und 0 entfernt, also nicht erwartungstreu. Daher wurden die Werte nach den Regressionsparametern linear transformiert, bevor aus ihnen der LAI berechnet wurde. Für die Geländemessungen besteht zwischen den mit dem LAI-2000 gemessenen und den aus Lidar-Daten geschätzten LAI-Werten eine Korrelation von 0.66 ( $r^2 = 0.44$ , signifikant mit  $p < 0.001$ ).

JENSEN et al. (2008) schätzten den LAI mit multipler Regression aus mehreren aus Lidar abgeleiteten Strukturgrößen. Ein ähnlicher Ansatz wurde mit den vorliegenden Daten getestet. Als Eingangsgrößen wurden die in den vorherigen Absätzen beschriebenen Parameter verwendet: Baumhöhe, Kronenlänge, Stammdichte und Bedeckungsgrad. Mit einer multiplen linearen Regression mit all diesen Parametern kann der im Gelände gemessene LAI mit einer Korrelation von 0.83 ( $r^2 = 0.69$ ) geschätzt werden. Eine Gefahr bei der Schätzung von Werten mittels multipler Regression ist eine Überanpassung, insbesondere, wenn die Eingangsparameter (Prädiktorvariablen) nicht unabhängig voneinander sind. Um diese Gefahr zu verrin-



**Abbildung 46:** Schätzung des LAI aus Lidar-Daten mit zwei unterschiedlichen Methoden

gern, wurde eine schrittweise multiple lineare Regression (SMR) durchgeführt. Bei der SMR wird nach und nach die Variable, die mit der höchsten statistischen Signifikanz einen Teil der zu schätzenden Variable erklärt, in das Regressionsmodell aufgenommen. Gleichzeitig wird für die bereits aufgenommenen Variablen getestet, ob sie nach Aufnahme einer weiteren Variable im Modell verbleiben (BACKHAUS et al. 2003, MathWorks 2008). Die SMR wurde in Matlab mit Hilfe der Funktion `stepwisefit` durchgeführt.

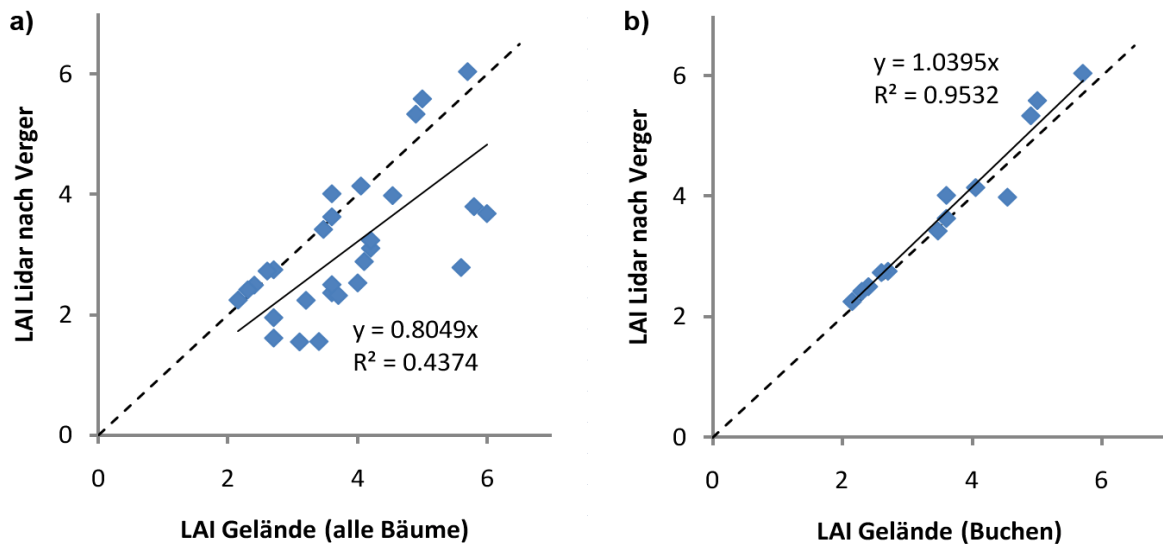
Für die vorliegenden Daten wurden der Bedeckungsgrad (FC) und die Stammdichte (SD) als erklärende Variablen in das SMR-Modell aufgenommen. Baumhöhe und Kronenlänge konnten keine ausreichende zusätzliche Varianzerklärung beisteuern und wurden folglich durch die SMR aus dem Modell ausgeschlossen. Die Korrelation der Modellwerte zu den Geländewerten liegt bei 0.81 ( $r^2 = 0.65$ ), beide Variablen haben Signifikanzwerte von  $p < 0.001$ . Ein Vergleich der LAI-Schätzung nur aus dem Bedeckungsgrad und der Schätzung mit den durch SMR ausgewählten Variablen ist in Abbildung 46 dargestellt. Neben der höheren Varianzerklärung ist Erwartungstreue ein Vorteil des Modells mit zwei erklärenden Variablen. Die Schätzwerte liegen sehr viel näher an der 1:1-Linie und können damit ohne weitere Umrechnungen verwendet werden.

VERGER et al. (2009) schlagen zur Berechnung des LAI aus dem Bedeckungsgrad  $FC$  für großflächige Datensätze von meteorologischen Satellitensensoren wie SEVIRI oder AVHRR die Berechnungsformel

$$LAI = \frac{-1}{b \cdot G(\theta = 0^\circ) \cdot \Omega} \cdot \frac{\ln(a_0 - FC)}{a_0} \quad (4-12)$$

vor, wobei  $b$  die spektrale Abhängigkeit der Strahlungsinterzeption charakterisiert,  $G(\theta=0^\circ)$  der Blattprojektionsfaktor bei Nadirsicht ist,  $\Omega$  ein Klumpungsindex und  $a_0$  ein empirischer Koeffizient, der übermäßig große LAI-Werte verhindert. Der Untersuchung von VERGER et al. (2009) folgend wird  $b$  auf den Wert 0.945,  $G$  auf 0.5,  $\Omega$  auf 1 und  $a_0$  auf 1.05 festgesetzt.

Wird in die Berechnungsvorschrift  $FC_{\text{Lidar(BL)}}$  nach HOPKINSON & CHASMER (2009) eingesetzt, ergibt sich eine relativ geringe Übereinstimmung mit den im Gelände gemessenen LAI-Werten (Abbildung 47a). Werden jedoch nur die Buchen betrachtet, liegt die Stärke des linearen Zusammenhangs ohne Achsenabschnitt bei  $r^2 = 0.95$  und hoher Erwartungstreue (Abbildung 47b). Mit einem Klumpungsparameter von  $\Omega = 0.6$  ergibt sich auf für die Blattflächenindizes der Fichten ebenfalls eine erwartungstreue Schätzung, allerdings mit deutlich größerer Streuung und einem Bestimmtheitsmaß von  $r^2 = 0.55$  (ohne Abbildung).



**Abbildung 47:** Schätzung des LAI aus Lidar-Daten nach dem Ansatz von VERGER et al. (2009)

## 4.7 Schätzung der Biomasse

Biomasse ist die Gesamtheit der trockenen Masse an organischem Material in einem Ökosystem. Es kann zwischen ober- und unterirdischer Biomasse unterschieden werden, wobei der Fernerkundung nur die oberirdische Biomasse zugänglich ist. Die oberirdische Biomasse besteht in Wäldern größtenteils aus Stämmen, Ästen und Blättern, die unterirdische aus Wurzeln, Mikroorganismen und abgestorbenen Organismen. Während für die Forstwirtschaft das nutzbare Holzvolumen entscheidend ist, ist für ökologische Betrachtungen die gesamte Biomasse wichtig (VAN LAAR & AKÇAN 2007).

Gute Schätzungen der Biomasse sind entscheidend für das Verständnis des Kohlenstoffkreislaufs in terrestrischen Ökosystemen, in denen Wälder ein Hauptreservoir an Kohlenstoff stellen. Die in Wäldern gespeicherte Biomasse hat damit einen entscheidenden Anteil an den globalen biogeochemischen Prozessen (ZHAO et al. 2009). Bei Geländemessungen wird die Biomasse meist aus der Baumhöhe oder dem Brusthöhenumfang bzw. der Basalfläche mit Hilfe von Ertragstafeln geschätzt (PATENAUDE et al. 2004). Dabei ist zu beachten, dass die in Deutschland verwendeten Ertragstafeln meist auf veralteten Daten beruhen und die aktuelle Klima- und Nährstoffversorgungssituation nicht mehr korrekt abbilden. Genaue Messungen der Biomasse im Wald sind nur durch Fällen und Wiegen der Bäume möglich. Fernerkundliche Abschätzungen der Biomasse wurden mit Stereophotogrammetrie, optischen Satelliten und mit Radar durchgeführt (ST-ONGE et al. 2008). IMHOFF (1995) hat für Radarschätzungen Obergrenzen von 20 t/ha im C-Band, 40 t/ha im L-Band und 100 t/ha im P-Band gefunden. Laut METTE et al. (2006) gibt es bei der Schätzung per Radar im L-Band eine Aufsättigung ab 40 t/ha und im P-Band bei 120 t/ha, laut ST-ONGE et al. (2008) sättigen Schätzungen der Biomasse per Lidar und mit einer Kombination von Lidar und hochauflösenden Ikonos-Satellitenbilddaten bei ca. 300 t/ha auf. NELSON et al. (2007) konnten die Biomasse von Kiefern mit einem speziell zur Biomassebestimmung entwickelten Radar mit einem Bestimmtheitsmaß von 0.82 schätzen, während eine Schätzung mit Lidar-Daten 93.3% der Va-

rianz erklären konnte. Ein kombiniertes Modell war der Lidar-Schätzung nicht mehr überlegen und erreichte 93.8% Varianzerklärung.

Luftgestützte Laserprofilerdaten wurden bereits 1988 von NELSON et al. zur Schätzung der oberirdischen Forst-Biomasse entlang von Transekten verwendet, später wurde Airborne Laserscanning u.a. von LEFSKY et al. (1999b), MEANS et al. (1999), PATENAUE et al. (2004), ST-ONGE et al. (2008) und ZHAO et al. (2009) eingesetzt. ZHAO et al. (2009) beispielsweise konnten die Biomasse mit einer Übereinstimmung von  $r^2 = 0.83$  zu Geländemessungen für 0.01 ha große Testgebiete und  $r^2 = 0.94$  für 1 ha große Gebiete schätzen. DUNCANSON et al. (2010) untersuchten die Eignung weltraumgestützter Laserscanningdaten von ICESat für die Bestimmung von Biomasse und Holzvolumen.

Zwei Ansätze zur Biomasseschätzung aus Laserscanningdaten wurden auf den Idarwald-Datensatz angewandt und werden im folgenden kurz vorgestellt:

NÆSSET & GOBAKKEN (2008) verwendeten zur Schätzung der ober- und unterirdischen Biomasse ein multiplikatives Modell mit zahlreichen Kandidatenvariablen in der Form

$$\begin{aligned} \ln Y = & \ln \beta_0 + \beta_1 \ln h_0 + \beta_2 \ln h_{10} + \dots + \beta_{10} \ln h_{90} \\ & + \beta_{11} \ln h_{mean} + \beta_{12} \ln h_{cv} \\ & + \beta_{13} \ln d_0 + \beta_{14} \ln d_1 + \dots + \beta_{22} \ln d_9 + e, \end{aligned} \quad (4-13)$$

wobei  $Y$  die im Feld gemessene Biomasse ist,  $\beta_i$  die Regressionskoeffizienten,  $h_i$  Höhenperzentile,  $h_{mean}$  die mittlere Höhe,  $h_{cv}$  der Variationskoeffizient der Höhen,  $d_i$  höhenabhängige Dichtemaße und  $e$  das Residuum. Von allen Variablen wurden schließlich in einer schrittweisen kleinste-Quadrate-Variablenauswahl ein Höhenmaß ( $h_{90}$ ) und ein Dichtemaß ( $d_0$ ) ausgewählt, wobei die Höhe 61% und die Punktdichte 21% der Varianz erklärten. Eine Anwendung des Modells von NÆSSET & GOBAKKEN (2008) auf die Idarwald-Daten führt zu Schätzungen der oberirdischen und unterirdischen Biomasse im Wertebereich von ca. 100 bis 400 t/ha und 10 bis 80 t/ha.

PATENAUE et al. (2004) verwendeten zur Schätzung der Biomasse in einem Wald bei Cambridge, UK, ein Modell der Form

$$AGCC = k \cdot a \cdot e^{b \cdot H\%}, \quad (4-14)$$

wobei  $AGCC$  für *Above-ground carbon content* steht,  $k$  ein Umrechnungsfaktor ist, der Holzvolumen in Kohlenstoffgehalt umrechnet,  $H\%$  ein Höhenmaß ist, und  $a$  und  $b$  Regressionskoeffizienten. Als Höhenmaß wurde das 80. Perzentil vorgeschlagen. Auf Bestandesebene konnte das Modell eine Korrelation von  $r = 0.85$  zu Geländedaten erreichen. Auf die Lidardaten vom Idarwald angewendet, ergibt das Modell von PATENAUE et al. (2004) ähnliche Biomassewerte wie das Modell von NÆSSET & GOBAKKEN (2008), allerdings mit einem geringeren Mittelwert und einer etwas größeren Streuung. Die Schätzungen können nicht validiert werden, da keine Referenzmessungen der Biomasse vorliegen.

## 4.8 Schätzung des Holzvorrats

In der Forstwirtschaft ist der Holzvorrat die entscheidende Größe zur Beschreibung eines Bestands, da er den ökonomischen Wert einer Waldfläche bestimmt. Im Gelände wird er meist aus dem Brusthöhendurchmesser geschätzt (KÖHL et al. 2006). Der Holzvorrat ist eng mit den bereits behandelten Größen Baumhöhe und Stammdichte sowie mit der Biomasse verknüpft; in der Fernerkundung wird er meist aus einer Kombination dieser Größen gewonnen, wenn sie verfügbar sind (ST-ONGE et al. 2008). Die Schätzung des Holzvolumens aus passiven Fernerkundungsdaten ist problematisch. TROTTER et al. (1997) nennen einige Untersuchungen, in denen mit Landsat TM das Holzvolumen, die Biomasse oder die Basalfläche geschätzt wurde. Bei diesen Untersuchungen wurden zwar signifikante Zusammenhänge, aber nur geringe Korrelationen gefunden. Daraus wird geschlossen, dass zwar für große Flächen relativ verlässliche Schätzungen abgegeben werden können, aber nicht für einzelne Bestände.

Bereits in den 1990er Jahren wurde Laserscanning zur Schätzung des Holzvolumens eingesetzt (NÆSSET 1997b). HYYPPÄ et al. (2001) konnten den Holzvorrat über die Baumhöhen und die aus einer Segmentierung abgeleiteten Kronenflächen mit einem relativen Fehler von 10.5% schätzen. MALTAMO et al. (2004) schätzten den Brusthöhendurchmesser aus der Baumhöhe und der projizierten Kronenfläche und das Holzvolumen über Ertragstafeln aus dem Brusthöhendurchmesser. Das Holzvolumen konnte dabei mit einem relativen Schätzfehler von 25% bestimmt werden.

Als Referenzwert kann der Stammholzvorrat  $V$  aus den Geländemessungen als Produkt von Stammzahl  $n$ , Baumhöhe  $h$  und Querschnittsfläche des Stamms abgeschätzt werden. Die Querschnittsfläche ergibt sich unter der Annahme eines kreisförmigen Querschnitts aus dem Brusthöhenumfang  $BHU$ . Da die Stämme keine Zylinder sind, sondern sich nach oben verjüngen, muß der Wert noch mit einem Formfaktor multipliziert werden. Der Formfaktor ist das Verhältnis des tatsächlichen Stammvolumens zum Volumen eines Zylinders (VAN LAAR & AKÇA 2007). Wenn man von einem kegelförmigen Stamm ausgeht, beträgt der Formfaktor  $1/3$ :

$$V = \frac{1}{3} \cdot n \cdot h \cdot \pi \left( \frac{BHU}{2\pi} \right)^2 \quad (4-15)$$

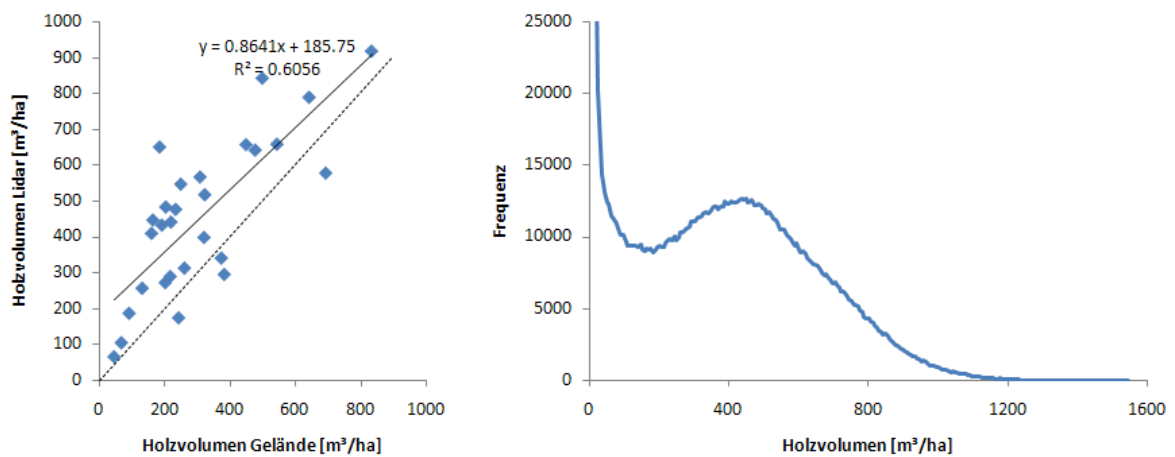
Da die Höhen nur von dominanten Bäumen gemessen wurden, aber alle Bäume gezählt wurden, überschätzt eine solche Berechnung den tatsächlichen Holzvorrat. Außerdem enthält der gemessene Brusthöhenumfang außer dem Holz auch Rinde, was zu einer weiteren Überschätzung führt. Eine Unterschätzung kommt dadurch zustande, dass der Vorrat in Ästen außer dem Stamm nicht berücksichtigt wird. Eine Korrektur dieser Effekte wird nicht durchgeführt, da keine Daten vorliegen, um sie zu quantisieren.

NÆSSET (2009a) schlug zur Berechnung des Holzvolumens von borealem Nadelwald aus Lidar-Daten folgende logarithmische Regressionsgleichung vor:

$$\ln V = 2.269 + 1.398 \cdot \ln h_{50} + 0.8733 \cdot \ln d_1 \quad (4-16)$$

Dabei ist  $h_{50}$  der Median der Höhe und  $d_1$  ein Dichtemaß. Zur Bestimmung von  $d_1$  wird die Zone zwischen 2 m über Grund und dem höchsten Laserecho in einem betrachteten Gebiet in 10 vertikale Stufen gleicher Höhe  $d_0...d_9$  eingeteilt.  $d_1$  die Zahl von First- und Only-Punkten über der entsprechenden Grenze geteilt durch die Gesamtzahl von First- und Only-Punkten im betrachteten Pixel.

Die nach Gleichung (4-15) berechneten Holzvolumina der Geländeplots korrelieren mit den nach NÆSSET (2009a) berechneten Volumina mit  $r = 0.78$  ( $r^2 = 0.61$ , signifikant mit  $p < 0.001$ ). Ein Austausch des Dichteparameters  $d_1$  gegen den besten in Abschnitt 4.5 bestimmten Bedeckungsgrad ( $Cover_{2-way(K=4)}$ ) brachte keine Erhöhung der Korrelation. Abbildung 48 zeigt die lineare Regression zwischen Gelände- und Lidar-Schätzung, die gestrichelte Linie ist dabei die 1-zu-1-Linie. Gerade bei geringen Geländewerten kommt es zu deutlichen Überschätzungen. Rechts ist das Histogramm der flächendeckenden Holzvolumenschätzung aus Lidar-Daten dargestellt.



**Abbildung 48:** Links: Aus Geländedaten und aus Lidar-Daten geschätztes Holzvolumen mit linearer Regression und 1:1-Linie, rechts: Histogramm der aus Lidar-Daten geschätzten Holzvolumina.

## 4.9 Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen

Laserscanneraufnahmen können auch genutzt werden, um Klassifikationen durchzuführen. Einige Studien verwenden Lidardaten, um Klassifikationen mit passiven Multi- oder Hyperspektralfernerkundungsdaten zu verbessern (siehe nächster Abschnitt). Aber auch mit Laserscanning alleine wurden Klassifikationen berechnet. Bereits SCHREIER et al. (1985) nutzten die Intensität, die Variabilität und die Höhe über Grund von Laserprofilerechos zur Unterscheidung von Laub- und Nadelwald sowie Gebieten mit niedriger Vegetation. BRANDTBERG (2007) klassifizierte Baumarten über eine Einzelbaumerkennung und Analysen der Kronenform. DONOGHUE et al. (2007) nutzten einerseits Intensitätsdaten und andererseits Bestandsdichtemaße eines Laserscanners, um den Anteil von Kiefern und Fichten zu in gemischten Beständen zu bestimmen und erreichten dabei Bestimmtheitsmaße von über 0.9. REITBERGER et al. (2008) nutzten Fullwave-Lidardaten in einer unüberwachten Klassifikation zur Unterscheidung von Laub- und Nadelbäumen. ANTONARAKIS et al. (2008) nutzten einen Entscheidungsbaum zur Klassifikation von Landnutzungsklassen und konnten dabei unter anderem

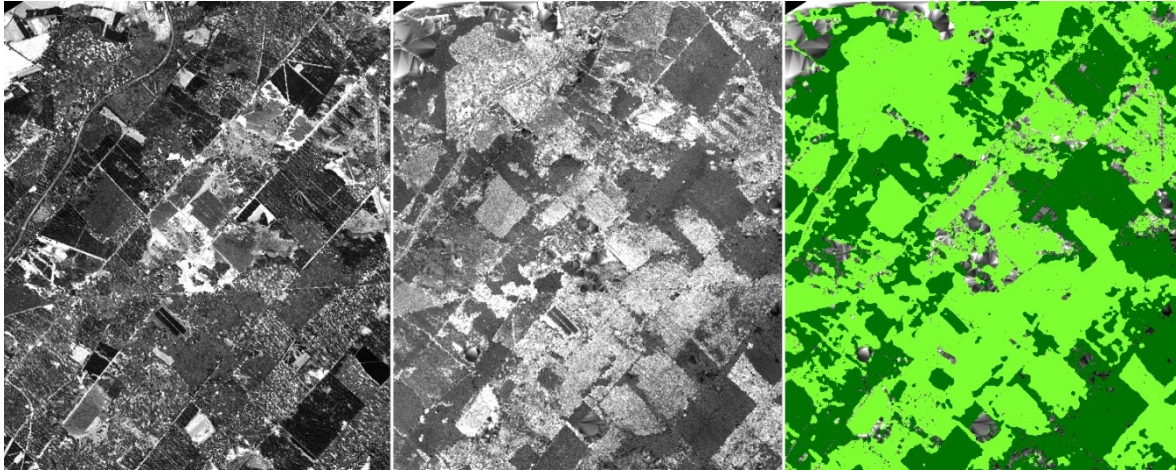


zwischen natürlichem und angepflanztem Wald in unterschiedlichen Altersstufen unterscheiden. ØRKA et al. (2009) nutzten unkalibrierte Intensitäten und Strukturmerkmale, um zwischen Fichten und Buchen zu unterscheiden. Sie konnten nur in First Echos zur Artenunterscheidung nützliche Informationen finden. KIM et al. (2009) zeigten in ihrer Studie zur Baumartenunterscheidung mit Lidar-Intensitätsdaten, dass die Unterscheidung im unbelaubten Zustand besser funktioniert als im belaubten Zustand. Die besten Klassifikationen sind bei Kombination von Datensätzen beider Zeitpunkte zu erwarten.

In den HyMap-Daten des Untersuchungsgebiets Idarwald liegt der Reflexionsgrad von Nadelwaldbeständen bei 1546 nm Wellenlänge bei ca. 6 %, der von Laubbeständen bei ca. 20 %. Für eine Unterscheidung zwischen Laub- und Nadelwaldbeständen anhand der Laserscannerdaten soll diese deutlich unterschiedliche Reflektivität der beiden Waldtypen ausgenutzt werden. Um keine Verfälschungen durch Bodenreflexion zu erhalten, wurde ein Intensitätsbild aus den First/Only-Punkten erstellt, die mindestens 2 m über dem Boden liegen. Die Intensitätswerte können als halbkalibriert angesehen werden, da distanzabhängige Unterschiede korrigiert sind, aber keine Messungen in absoluten physikalischen Einheiten vorliegen. Um kleinräumliche Variationen in diesem Bild zu minimieren wurde das Bild vor der Klassifikation mit einem 5 × 5 Pixel großen Medianfilter geglättet. Abbildung 49 zeigt in der Mitte einen Ausschnitt des Kronen-Intensitätsdatensatzes vor der Filterung. Links ist zum Vergleich der entsprechende Ausschnitt des normalen Intensitätsbilds dargestellt. Rechts ist das Ergebnis der Klassifikation. Die waldfreien Gebiete ohne Punkte in mehr als 2 m Höhe sind ausmaskiert.

Eine Klassifikation in zwei Klassen mit Daten eines einzelnen Kanals entspricht im Grunde einer Schwellenwertzuweisung. Durchgeführt wurde die Klassifikation in dem Programm Envi mit dem unüberwachten Isodata-Algorithmus und 12 Klassen, von denen die ersten (dunkleren) 5 Klassen als Nadelwald und die restlichen als Laubwald identifiziert wurden.

Da nicht nur der Reflexionsgrad über die aufgezeichnete Intensität entscheidet, kann keine fehlerfreie Klassifikation erwartet werden, aber für eine Klassifikation mit nur einem einzelnen Eingangskanal sieht das Ergebnis in einer visuellen Überprüfung sehr gut aus. Ein Vorteil der Verwendung von Laserscanner-Intensitäten gegenüber Luftbilddaten ist, dass die Nichtwaldgebiete problemlos ausgeschlossen werden können und dass es keine Schatten im Bild gibt. Zur Genauigkeitsabschätzung wurden die Daten des Forstinformationssystems FoGIS verwendet (vgl. Abschnitt 0). In allen Flächen, die laut FoGIS entweder mindestens 90 % Nadelwaldanteil oder 90 % Laubwaldanteil aufweisen, wurden 24 500 zufällige Punkte verteilt. Die Übereinstimmung der Klassifikationsergebnisse mit diesen Referenzpunkten beträgt 86 % (Kappa-Koeffizient 0.687, HUDSON & RAMM 1987, FOODY 2002).



**Abbildung 49:** Links: Intensität aller First/Only-Punkte. Mitte: Intensität der First/Only-Punkte ab 2 m über Grund. Rechts: Klassifikation in Laubwald (hellgrün) und Nadelwald (dunkelgrün).

## 4.10 Integration von Laserscanner- und Hyperspektraldaten

Hyperspektraldaten (VANE & GOETZ 1988, GOETZ 2009) bieten das Maximum spektraler Information, Full-Waveform-Laserscannerdaten das Maximum an Information über die dreidimensionale Bestandsstruktur. In der Kombination beider Datenquellen steckt daher das Potential, Waldbestände optimal fernerkundlich zu charakterisieren (siehe Abbildung 30). Bisher existieren einige Studien zur Kombination von Laserscanner- und Hyperspektraldaten, jedoch noch keine, in der Small-Footprint-Wellenform-Laserdaten mit Hyperspektraldaten kombiniert wurden.

GEERLING et al. (2007) nutzten CASI-Daten mit 10 Spektralbändern zwischen 437 und 890 nm mit einer räumlichen Auflösung von  $2 \times 2$  m und Minimum, Maximum, Mittelwert, Median, Spannweite und Standardabweichung der per Laserscanning gemessenen Höhen über Grund zur Klassifikation von Auenvegetation. Mit Laserscannerdaten alleine wurde eine Gesamtklassifikationsgenauigkeit von 41 % erreicht, mit Hyperspektraldaten alleine 74 %. Der kombinierte Datensatz konnte mit 81 % Genauigkeit klassifiziert werden.

KOETZ et al. (2007) fusionierten Daten von zwei Strahlungstransfermodellen, um synthetische hyperspektrale und Large-Footprint-Wellenform-Lidar-Daten zu erhalten. Dabei dienten die Lidar-Daten zur besseren Lösung des schlecht gestellten Inversionsproblems für Reflexionsmodelle (vgl. Abschnitt 5.4).

ASNER et al. (2008) verwendeten Lidar-Daten, um Vegetationshöhen zu messen und beschattete Bereiche zu maskieren. In den beleuchteten Bereichen über einer Minimalhöhe wurden mit Hyperspektraldaten des Sensors AVIRIS invasive Pflanzenarten in einem Hawaiianischen Regenwald detektiert.

THOMAS et al. (2008) schätzten Chlorophyll- und Carotenoidgehalte in einem borealen Mischwald. Dazu werden hyperspektrale Fernerkundungsdaten des Sensors CASI in 72 Kanälen zwischen 400 und 940 nm mit 4 m geometrischer Auflösung mit First- und Last-Puls-

Laserscannerdaten mit Punktdichten von 3 bis 8 m<sup>-2</sup> kombiniert. Die stärksten Beziehungen zu den Pigmentkonzentrationen haben der *Derivative Chlorophyll Index* und der *Red Edge inflection point*. Die Schätzungen konnten durch Integration des 25. Perzentils der Laserhöhen verbessert werden.

ANDERSON et al. (2008) kombinierten Daten des Large-Footprint-Wellenform-Lidar LVIS mit AVIRIS-Hyperspektraldaten um Basalfläche, oberirdische Biomasse und mittleren Stammdurchmesser sowie die Baumartenverteilung in einem nordamerikanischen Wald zu bestimmen. Die kombinierten Daten konnten dabei im Mittel 8–9% mehr Varianz erklären als die einzelnen Datenquellen. Kombiniert wurden 24 MNF-transformierte AVIRIS-Kanäle mit 4 LVIS-Perzentilen (25, 50, 75 und 100).

DALPONTE et al. (2008) verwendeten Hyperspektraldaten des Sensors AISA Eagle mit 126 Kanälen von 400 bis 990 nm Wellenlänge bei 1 m geometrischer Auflösung und Laserscannerdaten von einem Optech ALTM mit einer Punktdichte von 5.6 m<sup>-2</sup>. Unter anderem mit einem *Support-Vector-Machine-Algorithmus* (SVM) wurde in einem komplexen Waldgebiet zwischen 20 Baumarten und 3 sonstigen Klassen klassifiziert. Dabei konnten mit SVM die höchsten Genauigkeiten erzielt werden. Gegenüber nur auf Hyperspektraldaten beruhenden Klassifikationen wurde die Genauigkeit durch Hinzunahme eines lasergenerierten DOMs geringfügig erhöht. Dabei konnte der Umstand ausgenutzt werden, dass im betrachteten Untersuchungsgebiet einige Baumarten ähnliche Spektralsignaturen, aber unterschiedlichen Höhen aufweisen, also nicht jede Baumart in jeder Höhe vorkommt.

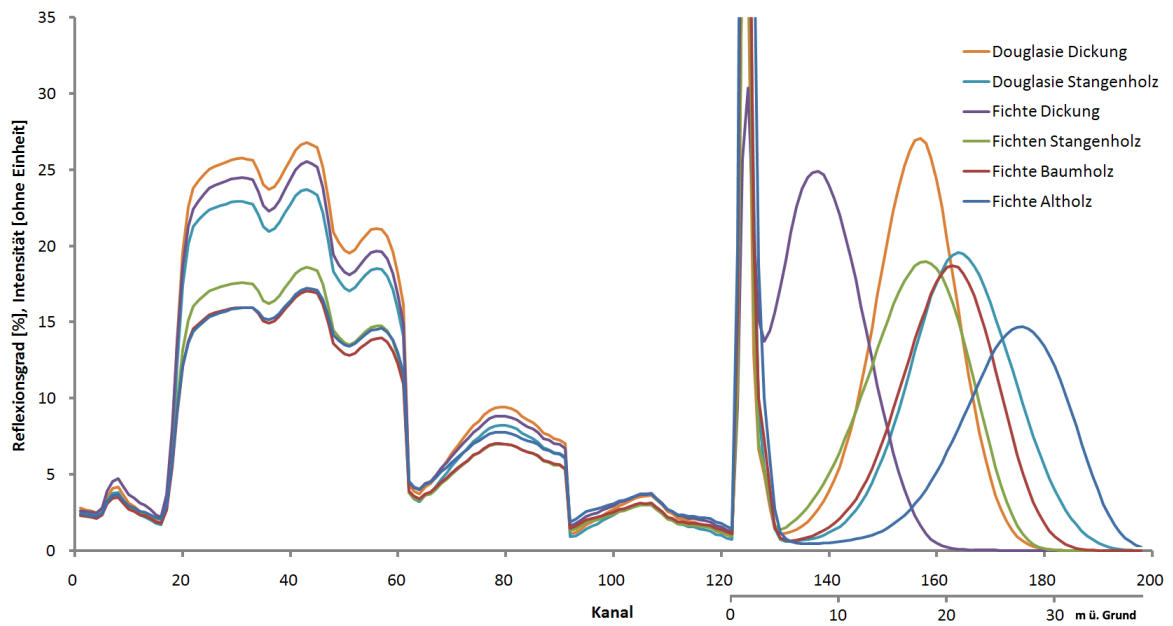
Eine vergleichbare Datenkombination aus AISA Eagle und ALTM verwenden KOETZ et al. (2008) zur Klassifikation für Waldbrandmanagement. Dabei werden aus den Lidar-Daten Signaturen der Punktdichte in vertikalen Abschnitten von 5 m Höhe abgeleitet. Diese wurden gemeinsam mit den Hyperspektraldaten zur Klassifikation in neun Typen von *Fire Fuel* verwendet.

Um das Potential der Fusionierung von Laserscannerdaten mit hyperspektralen Daten zu testen, wurden Klassifikationen der Baumarten und der Altersklassen im Untersuchungsgebiet Idarwald durchgeführt. Hierbei wurden Klassifikationsergebnisse der Hyperspektraldaten allein mit Ergebnissen der Kombination von Hyperspektraldaten mit unterschiedlichen Laserscanner-Produkten verglichen. Das Vorgehen wurde dabei an das in BUDDENBAUM et al. (2005) beschriebene Verfahren angelehnt: Die Klassifikation wurde ausschließlich in Nadelwaldbeständen durchgeführt. Dabei wurden vier Altersklassen von Fichtenbeständen (Dickung, Stangenholz, Baumholz und Altholz) und zwei Altersklassen von Douglasienbeständen (Dickung und Stangenholz) unterschieden. Ein Maximum-Likelihood-Klassifikator (LILLESAND & KIEFER 2000) wurde für jeden Bestandstyp an mehreren Kalibrierungsflächen trainiert, und das Klassifikationsergebnis in davon unabhängigen Validierungsflächen überprüft. Die Baumarten- und Altersangaben stammen aus einem Forst-GIS aus dem Jahr 1996 (VOHLAND 1997). Sie zeigen also eine deutliche zeitliche Abweichung zu den Fernerkundungsdaten aus den Jahren 2003 und 2005. Auf den Einsatz von Postklassifikationsalgorithmen und den Vergleich unterschiedlicher Klassifikatoren wurde verzichtet. Um die Datenmenge überschaubar

zu halten, die Daten zu dekorrelieren und um Rauschanteile zu eliminieren, wurden die Eingangsdaten vor der Klassifikation zunächst einer MNF-Transformation (GREEN et al. 1988) unterzogen. Bei Verwendung zu vieler redundanter Daten kann die Klassifikationsgenauigkeit abnehmen; dies ist als Hughes-Phänomen bekannt (KEY et al. 2001). Um dies zu vermeiden und die Datenmenge nicht zu groß werden zu lassen, wurden die Klassifikationen jeweils mit den ersten 32 MNF-Kanälen durchgeführt. Abbildung 50 stellt die gemittelten Spektren der Trainingsgebiete des kombinierten Eingangsdatensatzes aus Hyperspektraldaten und in Voxel überführten Wellenformdaten dar.

In einer ersten Klassifikation wurden als Eingangsdaten nur die hyperspektralen Fernerkundungsdaten des Sensors HyMap verwendet. Damit konnte ein Kappa-Koeffizient ( $\kappa$ , FOODY 2002) von 0.466 erreicht werden. Bei Kombination der Hyperspektraldaten mit aus den Wellenform-Laserscannerdaten berechneten Perzentile (10., 25., 50., 75., 85., 90. und 95. Perzentil) wurde  $\kappa$  auf 0.554 gesteigert. Ein aus dem HyMap-Bild und den vollen Wellenformdaten kombinierter Eingangsdatensatz (vgl. Abbildung 30) wurde mit  $\kappa = 0.632$  klassifiziert. Die Wellenformen alleine führen zu einer Klassifikation mit  $\kappa = 0.448$ . Die Klassifikationsgenauigkeiten sind detailliert in Konfusionsmatrizen in Anhang E dargestellt.

Die Hinzunahme der Strukturinformation aus Laserscanning führt zu einer eindeutigen Verbesserung der Klassifikationsergebnisse. Dies entspricht den Erwartungen, da außer nach Baumarten auch nach Altersstufen klassifiziert wurde. Bäume unterschiedlicher Altersklassen unterscheiden sich in ihrer Höhenstruktur deutlicher voneinander als in ihrer Spektralsignatur. Die insgesamt relativ niedrigen Gesamtklassifikationsgenauigkeiten lassen sich durch die schwierige Klassifikationsaufgabe erklären, da nur innerhalb des Nadelwaldes klassifiziert wurde. Damit haben alle betrachteten Pixel eine recht ähnliche Spektralsignatur und Verwechslungen sind zwischen allen Klassen möglich. Des weiteren gibt es eine große zeitliche Differenz zwischen den Validierungs- und Kalibrierungsdaten einerseits und den Bilddaten andererseits. Es ist durchaus möglich, dass in der Zwischenzeit einige Bestände durchforstet worden sind, so dass die Referenzklassen nicht mehr stimmen. Inzwischen sind viele Bestände eine Altersklasse aufgerückt, insbesondere die schnellwachsenden Douglasien. In Abbildung 50 ist zu erkennen, dass die Klasse Douglasie Dichtung deutlich höhere Bäume beinhaltet als die Klasse Fichte Dichtung, die Bäume der Klasse Douglasie Stangenholz entsprechen in ihrer Höhe der Klasse Fichte Baumholz.



**Abbildung 50:** Mittlere Signaturen der 6 Klassen. Kanäle 1 bis 122 enthalten HyMap-Reflexionswerte, Kanäle 123 bis 196 Laser-Intensitäten in Höhenschritten von 0.5 m.

## Kapitel 5 Reflexionsmodellierung

Um Vegetationscharakteristika aus Reflexionsmessungen abzuleiten, gibt es prinzipiell zwei Möglichkeiten: Empirisch-statistische Ansätze und die Verwendung von Reflexionsmodellen. Unter günstigen Bedingungen können statistische Ansätze zu befriedigenden Ergebnissen führen (z.B. JARMER et al. 2003, SCHLERF et al. 2010). Da aber die Reflexion von zahlreichen Faktoren abhängt, kann keine feste Beziehung zwischen Bestandsvariablen und Reflexions-signaturen immer oder überall angewandt werden (ATZBERGER 2004). Um den Informationsgehalt von Reflexionsspektren auszuschöpfen, wird ein Verständnis der Strahlungstransferprozesse im Vegetationsbestand benötigt (PEDRÓS et al. 2010). Bestandsreflexionsmodelle modellieren wellenlängen- und/oder richtungsabhängig den reflektierten Anteil der Einstrahlung auf Vegetationsbestände als Funktion der wichtigsten Bestands- oder Waldcharakteristika (ATZBERGER 2000). Bei der Invertierung von Reflexionsmodellen wird aus Reflexionswerten auf Bestandscharakteristika zurückgeschlossen (HEDLEY et al. 2009).

Schon seit den Anfängen der optischen Fernerkundung haben Strahlungstransfermodelle geholfen, die Lichtaufnahme von Pflanzenbeständen zu verstehen und die Reflexionsspektren von Vegetation hinsichtlich biophysikalischer Charakteristika zu interpretieren (VERHOEF 1984, JACQUEMOUD et al. 2009). Der Bedarf, fernerkundlich Vegetationsbestände zu identifizieren und Stress zu detektieren, ist seit langem von großer ökonomischer und wissenschaftlicher Bedeutung. Strahlungstransfermodelle können hier helfen, die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung aufzuklären (SUITS 1972). Bestandsstrahlungstransfermodelle beschreiben die Absorption und Streuung von Strahlung – die beiden wichtigsten physikalischen Prozesse im Vegetationsbestand – und können genutzt werden, um Vegetationsindizes zu entwerfen, Sensitivitätsanalysen durchzuführen und um Inversionsprozeduren zu entwickeln, mit denen aus fernerkundlich erhobenen Daten auf die Eigenschaften der Vegetation geschlossen werden kann (JACQUEMOUD et al. 2009). Strahlungstransfermodelle können beispielsweise dabei helfen, den Einfluss der Aufnahmebedingungen wie Beobachtungs- und Beleuchtungswinkel auf die reflektierte Strahlung vom Einfluss des Objekts selbst zu trennen (VERHOEF 1984).

Es kann unterschieden werden zwischen bihemisphärischer, direktionell-hemisphärischer und bidirektioneller Reflexion, wobei jeweils die Einstrahlung oder die reflektierte Strahlung im gesamten Halbraum oder nur in einem engen Kegel betrachtet wird (NICODEMUS et al. 1977). Vegetationsbestände weisen keine lambertschen Reflexionseigenschaften auf, so dass zur vollständigen Beschreibung ihrer Reflexionseigenschaften die bidirektionelle Reflexionsverteilungsfunktion (BRDF, *bidirectional reflectance distribution function*) verwendet werden muss (JACQUEMOUD & USTIN 2001). Es gibt inzwischen einige Fernerkundungssensoren, die reflektierte Strahlung aus mehreren unterschiedlichen Richtungen messen, beispielsweise MISR (*Multangle Imaging SpectroRadiometer*), POLDER (*POLarization and Directionality of the Earth's Reflectances*) und CHRIS (*Compact High Resolution Imaging Spectrometer*). Außerdem besitzen einige Sensoren wie AVHRR oder HyMap ein sehr großes Blickfeld (FOV), so

dass die Winkelabhängigkeit der Reflexion auch hier berücksichtigt werden sollte. Bestandsreflexionsmodelle erlauben meist die Angabe von Zenit- und Azimutwinkeln für Beobachtung und Beleuchtung sowie die Angabe des Anteils diffuser Einstrahlung, entweder direkt oder über eine Festlegung der Atmosphärenbedingungen.

Es gibt zahlreiche Reflexionsmodelle für Forstbestände (GOEL 1988, JACQUEMOUD et al. 2000, WIDLÓWSKI et al. 2009). Üblicherweise wird ein Modell für die Reflexion und Transmission von Blättern oder Nadeln mit einem oder mehreren Modellen für die restlichen beteiligten Oberflächen und den Strahlungstransfer zwischen den Bestandselementen verknüpft. Eindimensionale Bestandsmodelle wie SAIL (VERHOEF 1984), die den Bestand als trübes Medium behandeln, werden dem komplexen Aufbau von Forstbeständen mit Lücken, Klumpungen und vertikaler Heterogenität nicht gerecht (HILL 2009). Dreidimensionale Bestands-Strahlungstransfermodelle wie DART (GASTELLU-ETCHEGORRY et al. 2004), FLIGHT (KÖTZ et al. 2004), FRT (KUUSK & NILSON 2000) oder INFORM (ATZBERGER 2000a & b) können die Bestandsstruktur parametrisieren, entweder indem der Bestand im Ganzen charakterisiert wird oder indem Position und Struktur einzelner Bäume angegeben werden.

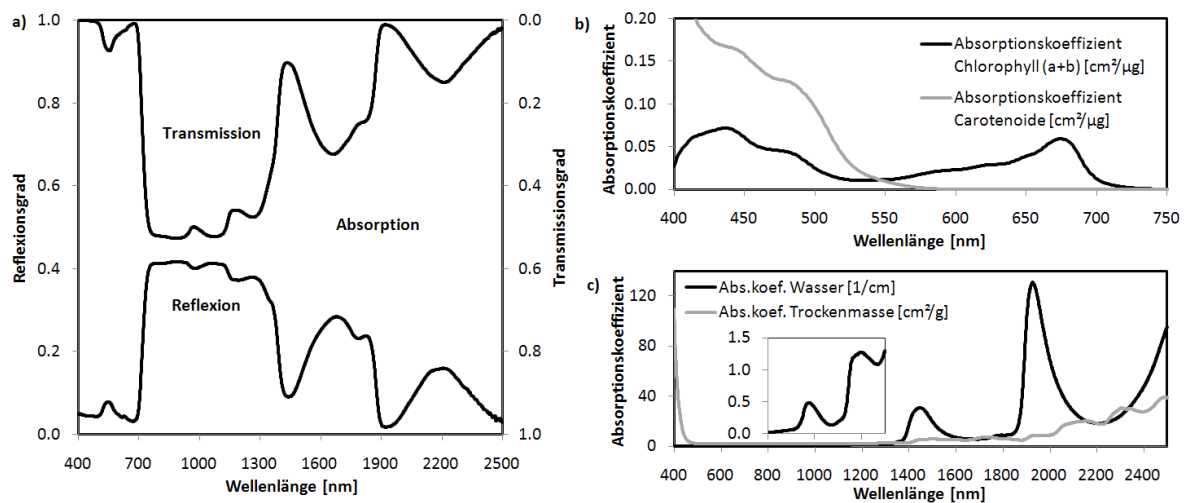
Im folgenden werden zunächst PROSPECT und LIBERTY, Modelle für die Reflexion und Transmission von Blättern und Nadeln, vorgestellt. Der darauf folgende Abschnitt beschreibt die beiden Bestandsmodelle INFORM und FRT, bevor Inversionsstrategien für Reflexionsmodelle beschrieben und Inversionsergebnisse der Bestandsreflexionsmodelle dargestellt werden. Dabei soll insbesondere untersucht werden, wie Laserscanningdaten bei der Invertierung helfen können. Der Schwerpunkt liegt dabei nicht auf der optimalen Invertierung, sondern auf dem Vergleich der Methoden und der Einbeziehung der Lidar-Daten.

## 5.1 Modellierung der Blatt- und Nadelreflexion

Blätter oder Nadeln sind die wichtigste Oberfläche von Vegetationsbeständen für den Austausch von Energie und Gasen, daher sind ihre optischen Eigenschaften wesentlich für das Verständnis des Strahlungstransports innerhalb der Vegetationsbestände (JACQUEMOUD & USTIN 2001, STUCKENS et al. 2009).

Die spektrale Verteilung des Reflexionsgrads von Blättern oder Nadeln im optischen Wellenlängenbereich von 400 bis 2500 nm lässt sich in drei Bereiche einteilen (JACQUEMOUD & USTIN 2001): Im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts (400 bis 700 nm) dominiert die Absorption durch Chlorophyll und weitere Pigmente wie Carotenoide. Der größte Teil des blauen und roten Lichts wird vom Chlorophyll absorbiert und für die Photosynthese genutzt. Im grünen Bereich des Spektrums gibt es ein lokales Absorptionsminimum um 550 nm, was sich im sogenannten *Green Peak* des Reflexionsspektrums und in der grünen Farbe von gesunden Blättern ausdrückt. Nach dem sichtbaren Licht folgt ein steiler Anstieg von Reflexion und Transmission, die sogenannte *Red Edge* bei ca. 700 nm. Das Nahinfrarotplateau von 700 bis 1300 nm zeichnet sich zunächst durch die Abwesenheit von absorbierenden Blattinhaltsstoffen aus. Hier wird die Strahlung an den Grenzflächen zwischen Blattwänden und Wasser- und Lufteinschlüssen mehrfach gestreut, was sich durch Reflexions- und Transmissionswerte von

jeweils ca. 50%, abhängig von der Blattstruktur, ausdrückt. Bei 975 und 1200 nm liegen zwei relative schwache Wasserabsorptionsbanden. Im Wellenlängenbereich des mittleren Infrarots von 1300 bis 2500 nm dominiert die Wasserabsorption mit starken Banden um 1450, 1950 und 2600 nm bei frischen Blättern, bei getrockneten Blättern werden einige Absorptionsmerkmale des trockenen Blattmaterials sichtbar (LILLESAND & KIEFER 2000, VAN DER MEER & DE JONG 2001). Abbildung 51a zeigt die hemisphärisch-direktionelle Reflexion und Transmission eines frischen Blattes, gemessen mit einem Fieldspec-II-Spektorradiometer und einer integrierenden Sphäre (DAUGHTREY et al. 1989). Die nicht reflektierte oder transmittierte Strahlung wird vom Blatt absorbiert. In Abbildung 51b und c sind die Absorptionskoeffizienten von Chlorophyll und Carotenoiden, die nur im sichtbaren Bereich des Lichts aktiv sind, und die von Wasser und Trockenmasse dargestellt.



**Abbildung 51:** a) Reflexion und Transmission eines Blattes, gemessen bei diffuser Einstrahlung mit einer integrierenden Sphäre, b) Absorptionskoeffizienten für Chlorophyll und Carotenoide, c) Absorptionskoeffizienten für Wasser und Trockenmasse, die schwachen Wasserabsorptionsbanden bei 975 und 1200 nm sind mit eigener Ordinatenenteilung abgesetzt dargestellt. b) und c) stammen aus dem Modell PROSPECT-5.

Für die Modellierung der Reflexions- und Transmissionseigenschaften von Blättern und Nadeln gibt es zahlreiche Modelle unterschiedlicher Modellphilosophie. Abbildung 52 gibt einen Überblick über gebräuchliche Modelltypen unterschiedlicher Komplexität. Die einfachsten Modelle betrachten Blätter als einzelne streuende und absorbierende Schicht. In den komplexesten Modellen werden die Zellen des Blattes hinsichtlich ihrer Form, Position, Größe und biochemischen Zusammensetzung detailliert beschrieben (MILLER et al. 2005). Schichtenmodelle (Abbildung 52a) repräsentieren das Blatt als eine oder mehrere absorbierende Schichten mit rauher Oberfläche (JACQUEMOUD & USTIN 2001). PROSPECT ist das bekannteste Schichtenmodell und wird im nächsten Abschnitt genauer beschrieben. N-Flux-Modelle (Abbildung 52b) betrachten das Blatt als Platte aus streuendem und absorbierendem Material nach der Kubelka-Munk-Theorie (GOEL 1988, MILLER et al. 2005). Der einzige Vertreter der *Compact spherical particle models* (Abbildung 52c) ist das Modell LIBERTY, das im übernächsten Abschnitt behandelt wird. Modelle nach der Strahlungstransfertheorie (Abbildung 52d) beschreiben das Blatt als eine Wasserplatte mit unregelmäßiger Oberfläche und zufällig verteilten Partikeln darin. In stochastischen Modellen (Abbildung 52e) wird der Strahlungstransfer

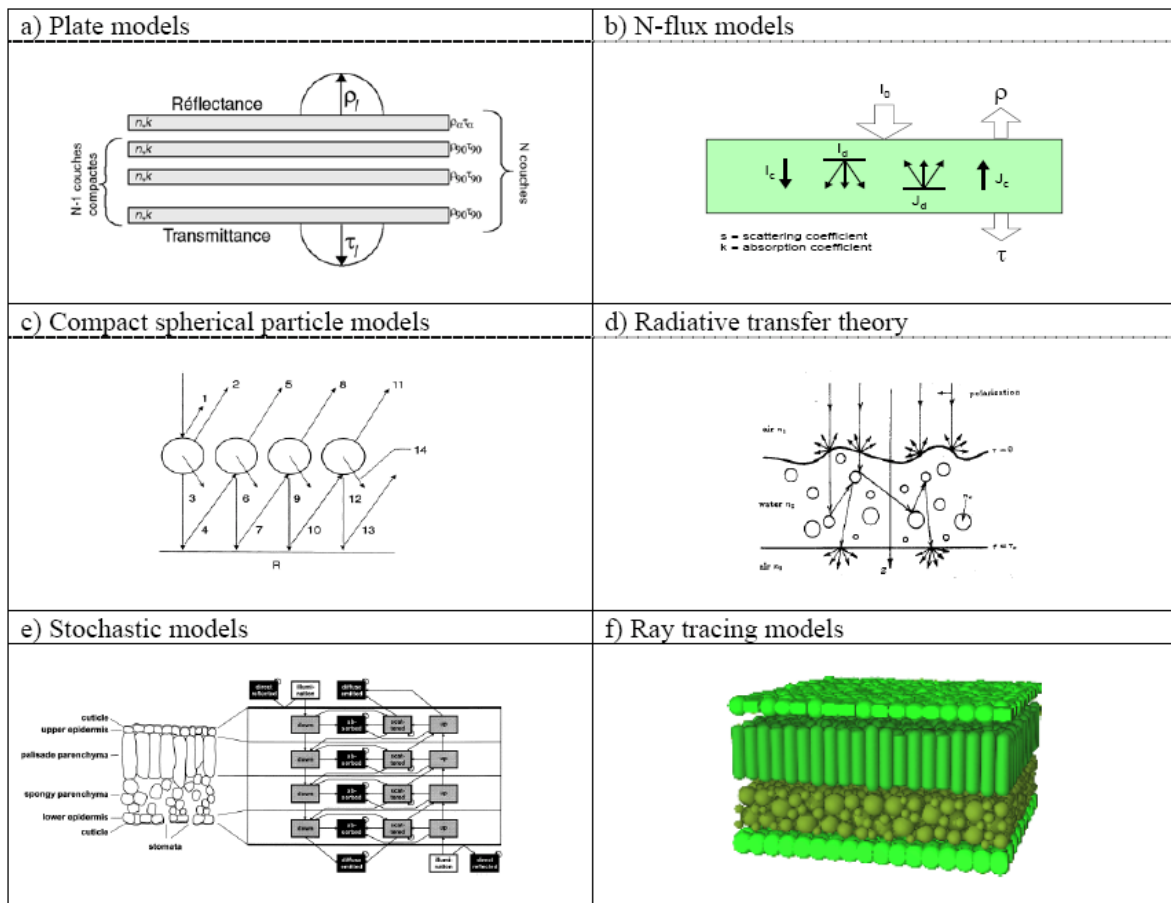


im Blatt über eine Markov-Kette simuliert. Dabei werden es für die Grenzschichten der Blattkompartimente wie Palisadenparenchym und Schwammparenchym Wahrscheinlichkeiten für Reflexion, Transmission und Absorption angewendet (JACQUEMOUD & USTIN 2001, MILLER et al. 2005). Ray-Tracing-Modelle (Abbildung 52f) benötigen eine detaillierte Beschreibung der inneren Blattstruktur und der optischen Eigenschaften der Blattmaterialien. Daraus wird der Weg einzelner Photonen simuliert und die gesamte Reflexion und Transmission abgeleitet (JACQUEMOUD & USTIN 2001, MILLER et al. 2005).

Aktuelle Entwicklungen bei der Modellierung der optischen Eigenschaften von Blättern konzentrieren sich außer auf die Reflexion und Transmission auch auf die bidirektionelle Reflexionsverteilung, auf die Modellierung der Fluoreszenz, auf die Trennung der einzelnen Blattpigmente und auf die Unterschiede zwischen Blattober- und -unterseite (FERET et al. 2008, STUCKENS et al. 2009, PEDRÓS et al. 2010).

### 5.1.1 PROSPECT

Zur Modellierung der Reflexion und Transmission der Blätter wird das Modell PROSPECT verwendet. Die PROSPECT-Modellfamilie modelliert die directionell-hemisphärische Reflexion von Blättern monokotyler und dikotyler Arten sowie senescente Blätter über das solare



**Abbildung 52:** Unterschiedliche Modelltypen für die optischen Eigenschaften von Blättern (Quelle: MILLER et al. 2005).

Spektrum von 400 bis 2500 nm (JACQUEMOUD & BARET 1990, JACQUEMOUD et al. 2009). Die Modellierung basiert auf einer Repräsentation des Blattes als eine oder mehrere absorbierende Schichten mit rauhen Oberflächen; PROSPECT gehört damit zu den Schichtmodellen (Abbildung 52a). Das Modell verwendet zwei Klassen von Inputparametern: Einerseits der Blattstrukturparameter  $N$ , der die Anzahl der übereinanderliegenden Schichten und damit die mittlere Zahl von Luft-Zellenwand-Grenzflächen im Mesophyll beschreibt. Bei monokotylen Blättern beträgt der Strukturparameter 1, bei dikotylen Blättern liegt er darüber. Die zweite Klasse von Inputparametern sind die biochemischen Inhaltsstoffe des Blattes. Die Zusammensetzung der berücksichtigten Inhaltsstoffe hat sich im Laufe der Entwicklung von PROSPECT leicht verändert (JACQUEMOUD et al. 2009). In der ursprünglichen Modellversion werden nur die Konzentrationen von Chlorophyll a und b und Wasser ( $C_{ab}$  und  $C_w$ ) angegeben (JACQUEMOUD & BARET 1990, JACQUEMOUD 1993), in PROSPECT-2 außerdem die von Protein, Cellulose, Lignin und weiteren Inhaltsstoffen (JACQUEMOUD et al. 1996). Diese Modellversion wurde von BARET & FOURTY (1997) so vereinfacht, dass außer Chlorophyll und Wasser nur noch der Gehalt an trockenem Blattmaterial ( $C_m$ ) angegeben wird (JACQUEMOUD 2000). LE MAIRE et al. (2004) erhöhten für PROSPECT-3 die spektrale Auflösung von 5 nm auf 1 nm. Für die Versionen PROSPECT-4 und 5 (FERET et al. 2008) wurden mit Hilfe von Datensätzen aus unterschiedlichen Ökozonen neue Refraktionsindizes und neue Absorptionskoeffizienten bestimmt. In PROSPECT-5 erfolgte außerdem eine Trennung der Blattpigmente in Chlorophyll a und b einerseits und Carotenoide andererseits. Einen deutlichen Unterschied in den modellierten Spektren gibt es allerdings nur bei sehr geringen Chlorophyllkonzentrationen. Eine aktuelle Weiterentwicklung von PROSPECT namens FluorMODleaf berücksichtigt auch die Fluoreszenz der Blätter (PEDRÓS et al. 2010). Abbildung 51b und c zeigt die in PROSPECT-5 verwendeten Absorptionskoeffizienten. Tabelle 7 listet die Eingangsparameter von PROSPECT-4 auf.

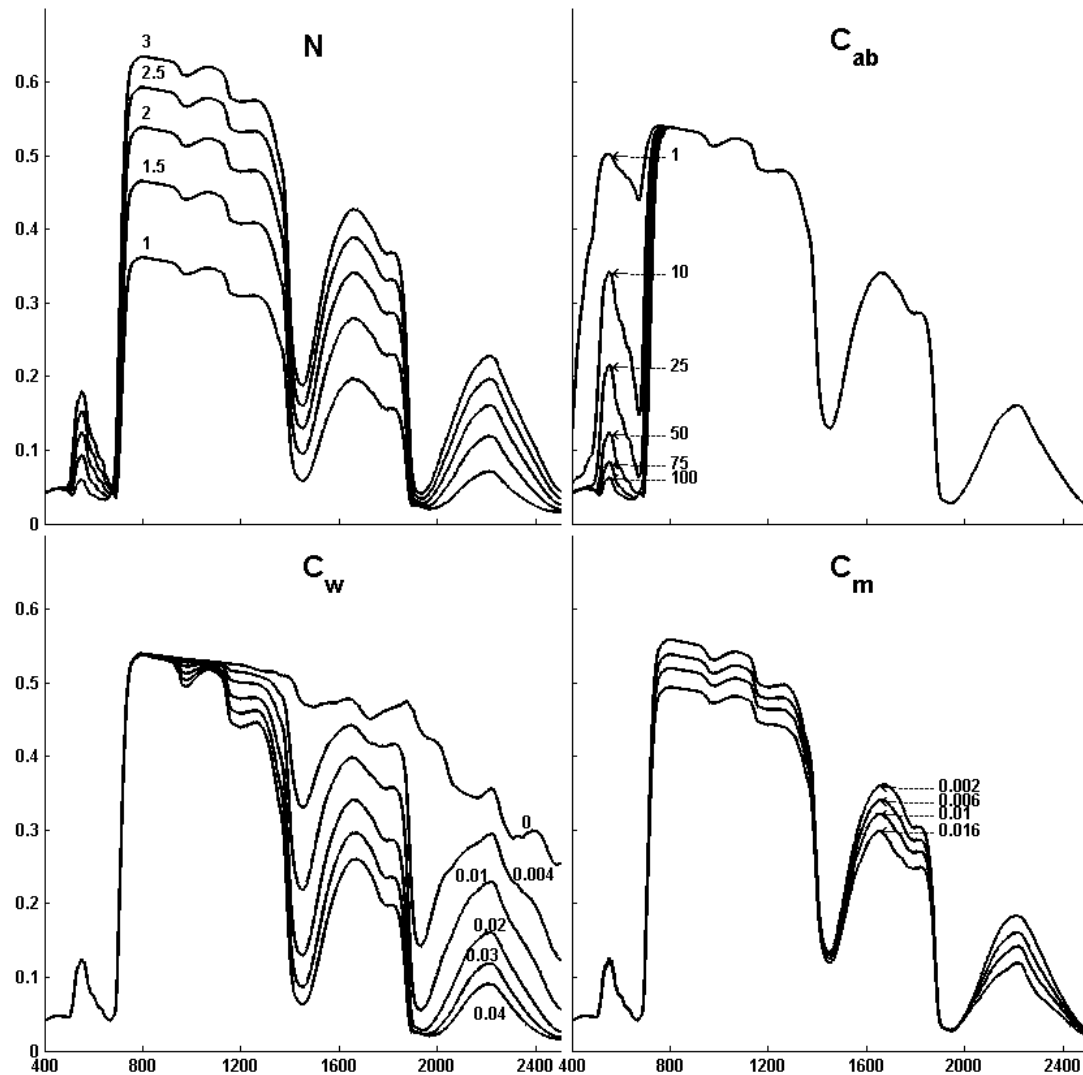
Der Absorptionskoeffizient  $k$  für eine Blattschicht wird in PROSPECT nach

$$k(\lambda) = k_e(\lambda) + \frac{C_{ab}}{N} K_{ab}(\lambda) + \frac{C_m}{N} K_m(\lambda) + \frac{C_w}{N} K_w(\lambda) \quad (5-1)$$

berechnet, wobei  $\lambda$  die Wellenlänge ist und  $k_e$  die Absorption eines „Albino“-Blattes, die die Absorption aller Inhaltsstoffe außer Chlorophyll, Trockenmasse und Wasser beinhaltet.  $K_{ab}$ ,  $K_m$  und  $K_w$  sind die spezifischen Absorptionskoeffizienten dieser drei Konstituenten (JACQUEMOUD et al. 1996, HILL 2009). Reflexion und Transmission des Blatts werden aus den Absorptionskoeffizienten und den Brechungsindizes der Blattbestandteile berechnet.

**Tabelle 7:** Eingangsparameter von PROSPECT-4

Symbol	Name	Einheit	Standardwert
$N$	Strukturparameter	-	2
$C_{ab}$	Chlorophyllgehalt	$\mu\text{g}/\text{cm}^2$	60
$C_w$	Wassergehalt	$\text{g}/\text{cm}^2$	0.025
$C_m$	Trockenmasse	$\text{g}/\text{cm}^2$	0.025



**Abbildung 53:** Mit PROSPECT-4 modellierte Blattreflexion. Die verwendeten Parameter sind  $N=2$ ,  $C_{ab}=50$ ,  $C_w=0.02$ ,  $C_m=0.006$ , wobei jeweils ein Parameter variiert wird. Auf der Abszisse sind Wellenlängen in nm aufgetragen, auf der Ordinate Reflexionsgrade.

Um den Einfluss der einzelnen Eingangsparameter auf das resultierende Blattreflexionsspektrum aufzuklären, ist in Abbildung 53 das Ergebnis einer Sensitivitätsanalyse von PROSPECT-4 dargestellt. Bei der Sensitivitätsanalyse eines Modells wird üblicherweise ein einzelner Eingangswert innerhalb seines realistischen Wertebereichs verändert, während die anderen unverändert gelassen werden (WHITE et al. 2000, BACOUR et al. 2002). Dadurch wird sichtbar, welcher Parameter welchen Einfluss auf welchen Spektralbereich hat.

Die Variation des Strukturparameters  $N$  verursacht sehr deutliche Änderungen der Blattreflexion in fast allen Spektralbereichen. Die einzigen Wellenlängen ohne deutliche Effekte sind die Bereiche, in denen Chlorophyll oder Wasser so stark absorbieren, dass eine Änderung der Schichtenanzahl keinen Effekt mehr zeigt. Die Zunahme der Reflexion bei steigendem  $N$  nimmt bei großen  $N$  ab, der Effekt sättigt also auf. Zusätzliche Blattschichten können nicht mehr stärker streuen oder absorbieren, wenn sie kein Licht mehr erhalten, da dieses bereits von den oberen Schichten gestreut oder absorbiert wurde. Ein hoher Wert von  $N$  entspricht

mehreren übereinander gestapelten Blättern. Die Variation von  $C_{ab}$  zeigt nur im sichtbaren Bereich Veränderungen des Reflexionsspektrums, da Chlorophyll auch nur im sichtbaren Bereich absorbiert. Außer der Tiefe der Absorptionsbanden ändert sich auch die Wellenlänge des sprunghaften Anstiegs der Reflexion zwischen Rot und Nahinfrarot, der *Red Edge*. Diese Wellenlänge wird meist über die Position des Wendepunkts, des *Red Edge Inflection Point*, charakterisiert. Die Veränderung des Wassergehalts  $C_w$  schlägt sich nur im infraroten Bereich des Spektrums nieder. Dabei ist deutlich zu erkennen, dass die Wasserabsorptionsbande um 1950 nm bei einem Wassergehalt von 0.03 g/cm<sup>2</sup> aufsättigt und bei höherem Wassergehalt nicht mehr tiefer wird. Die anderen Wasserabsorptionsbanden, insbesondere die im Nahinfrarotbereich, zeigen dieses Verhalten im getesteten Wertebereich nicht. Eine Steigerung der Trockenmasse  $C_m$  führt außerhalb der starken Wasserabsorptionsbanden im gesamten infraroten Bereich zu einer gleichmäßigen Abnahme des Reflexionsgrads.

Die Variation eines einzelnen Parameters entspricht allerdings selten dem Verhalten eines Blattes in der Natur. Hier verändern sich meistens mehrere Parameter gleichzeitig. So bleibt beispielsweise bei der Austrocknung eines realen Blattes die Reflexion im Nahinfrarotbereich um 800 nm nicht so stabil wie in der Abbildung, da sich mit der Austrocknung auch die Struktur des Blattes ändert.

### 5.1.2 LIBERTY

LIBERTY (*Leaf Incorporating Biochemistry Exhibiting Reflectance and Transmittance Yields*) ist ein Reflexionsmodell, das vor allem zur Simulation von Nadelspektren Anwendung findet (DAWSON et al. 1998). LIBERTY kann die Reflexion und Transmission von einzelnen Nadeln oder Nadelstapeln im Wellenlängenbereich von 400 bis 2500 nm modellieren (SCHLERF & ATZBERGER 2006). In der Modelltypenübersicht in Abbildung 52 ist LIBERTY als einziger Vertreter zu den *Compact spherical particle models* zu zählen (MILLER et al. 2005).

LIBERTY behandelt Nadeln als eine Ansammlung von Zellen und berechnet die Mehrfachstreuung zwischen den Zellen. Reflexion und Transmission werden als Funktion von drei Strukturparametern (Zellendurchmesser, Zellzwischenraum und Blatt-/Nadeldicke), zwei Absorptionsgrößen (Grundabsorption und Albinoabsorption) und vier biochemischen Kon-

**Tabelle 8:** Eingangsparmeter von LIBERTY

Symbol	Name	Einheit	Standardwert
$d$	Zellendurchmesser	µm	40
$i$	Zellzwischenraum ( <i>Intercellular air space</i> )	-	0.03
$t$	Blatt-/Nadeldicke	-	1.6
$b$	Grundabsorption ( <i>Baseline absorption</i> )	-	0.0006
$a$	Albinoabsorption	-	0.5
$C_{ab}$	Chlorophyllgehalt	mg/m <sup>2</sup>	200
$C_w$	Wassergehalt	g/m <sup>2</sup>	100
$C_m$	Lignin- und Cellulosegehalt	g/m <sup>2</sup>	40
$C_p$	Stickstoffgehalt	g/m <sup>2</sup>	1

zentrationen (Chlorophyllgehalt, Wassergehalt, Lignin- und Cellulosegehalt und Stickstoffgehalt) berechnet. Die Eingangsgrößen und typische Werte sind in Tabelle 8 aufgeführt.

Das Modell LIBERTY liegt als Matlab-Funktion vor. Ebenso wie bei PROSPECT wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt, um den Effekt der einzelnen Eingangsparameter zu beschreiben. Hierzu wurde wiederum jeweils ein Parameter verändert, während die anderen auf den in Tabelle 8 aufgeführten Werten verblieben. Die resultierenden Spektren sind in Abbildung 54 dargestellt. Die eingesetzten Werte können den Legenden entnommen werden. Die Werte orientieren sich an Angaben aus DAWSON et al. (1998) und SCHLERF & ATZBERGER (2006). Der Standardwert für die Albinoabsorption wurde auf 0.5 gesetzt, da so die Spektren eine größere Ähnlichkeit zu Bild- und Laborspektren aufweisen als bei dem von SCHLERF & ATZBERGER (2006) gewählten Wert von 2. DAWSON et al. (1998) nennen keinen Wert für die Albinoabsorption. Zellendurchmesser, Zellzwischenraum, Nadeldicke und Grundabsorption haben jeweils einen sehr großen Einfluss auf das resultierende Spektrum. Dies sind Werte,

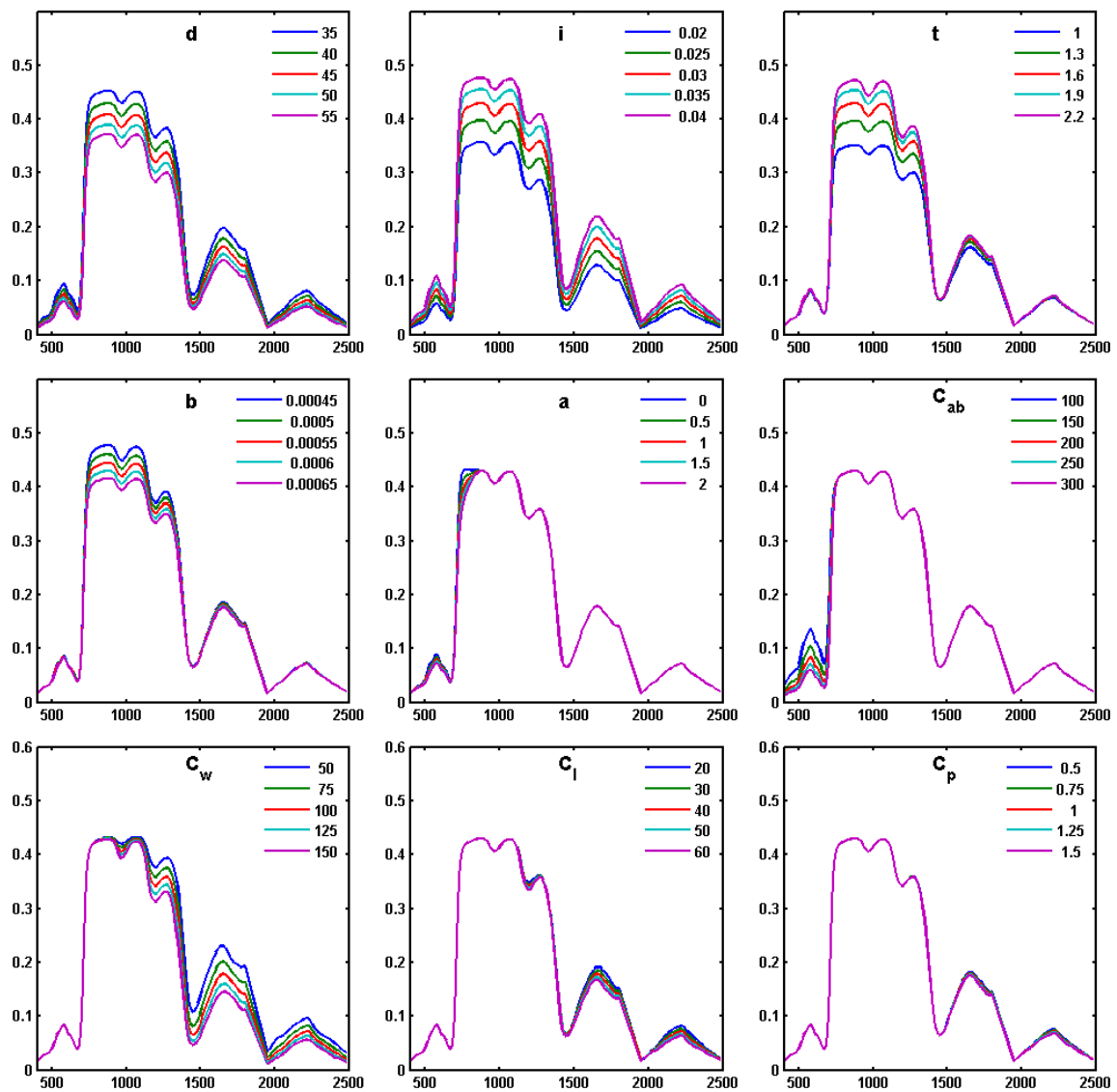
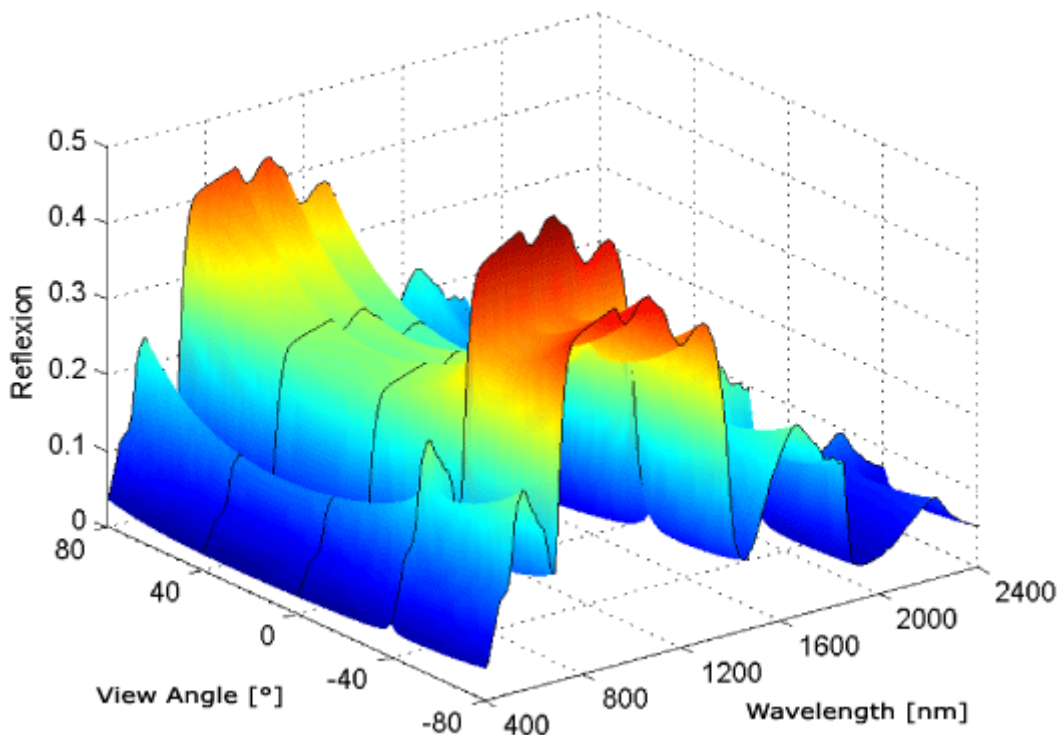


Abbildung 54: Sensitivitätsanalyse LIBERTY; zur Bedeutung der Variablen siehe Tabelle 8.

für die keine eigenen Messungen und keine Erkenntnisse über typische Wertebereiche vorliegen.

Die Einflüsse von Chlorophyll und Wasser sind denen bei PROSPECT ähnlich, der Wertebereich wurde hier allerdings in geringerem Maße variiert. Lignin und Cellulose sowie Stickstoff wirken sich vergleichsweise schwach aus, im kurzwelligen Spektralbereich überhaupt nicht.

## 5.2 Das Bestandsreflexionsmodell FRT

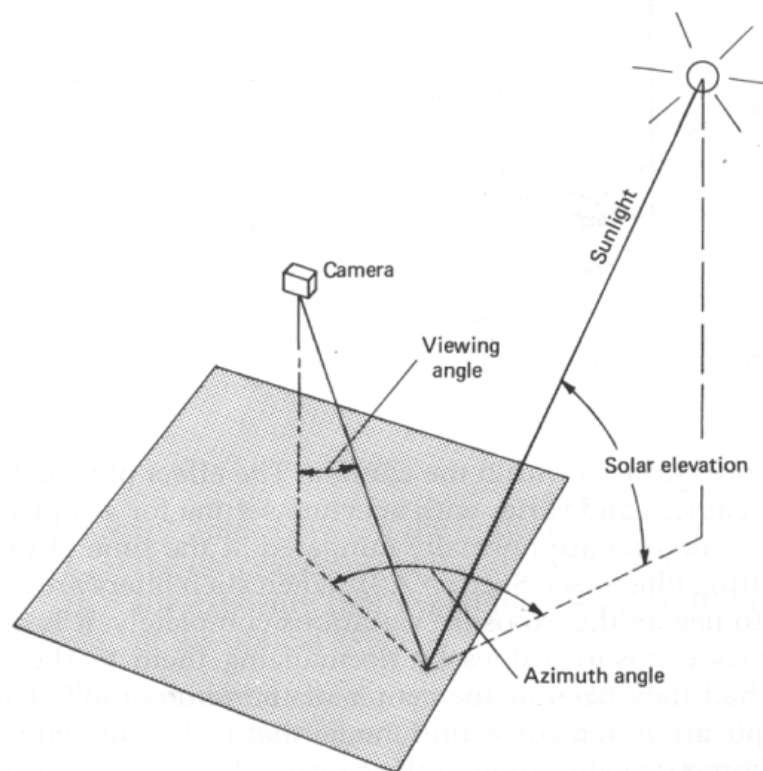


**Abbildung 55:** Mit FRT simuliertes multiangulares Reflexionsspektrum

FRT (*Forest Reflectance and Transmittance*, KUUSK & NILSON 2000, 2005) ist ein Forstbestands-Reflexionsmodell, das auf einem Modell von NILSON & PETERSON (1991) basiert. Als Blattreflexionsmodell kann wahlweise PROSPECT-2 oder LIBERTY verwendet werden. Die Reflexion des Unterwuchses wird mit dem Modell MCRM2 (KUUSK 2001) modelliert, welches einen zweistöckigen Aufbau des Unterwuchses annimmt (z.B. Krautschicht und Strauchschicht oder Moos unter einer Grasschicht) und auf den Modellen MSRM (*Multispectral Canopy Reflectance Model*, KUUSK 1994) und MCRM (*Markov Chain Reflectance Model*, KUUSK 1995a) basiert. Die Reflexionsspektren des Bodens werden durch Price-Vektoren erzeugt (PRICE 1990, siehe folgenden Abschnitt). Der atmosphärische Strahlungstransfer, insbesondere das wellenlängenabhängige Verhältnis zwischen direkter und diffuser Einstrahlung, wird mit dem Modell 6S (*Second simulation of the satellite signal in the solar spectrum*, VERMOTE et al. 1997) berechnet. FRT berücksichtigt die nicht-lambertsche Reflexion des Bodens, spiegelnde Reflexionsanteile direkter Sonneneinstrahlung auf Blätter und den Hot-spot-Effekt (KUUSK & NILSON 2005).

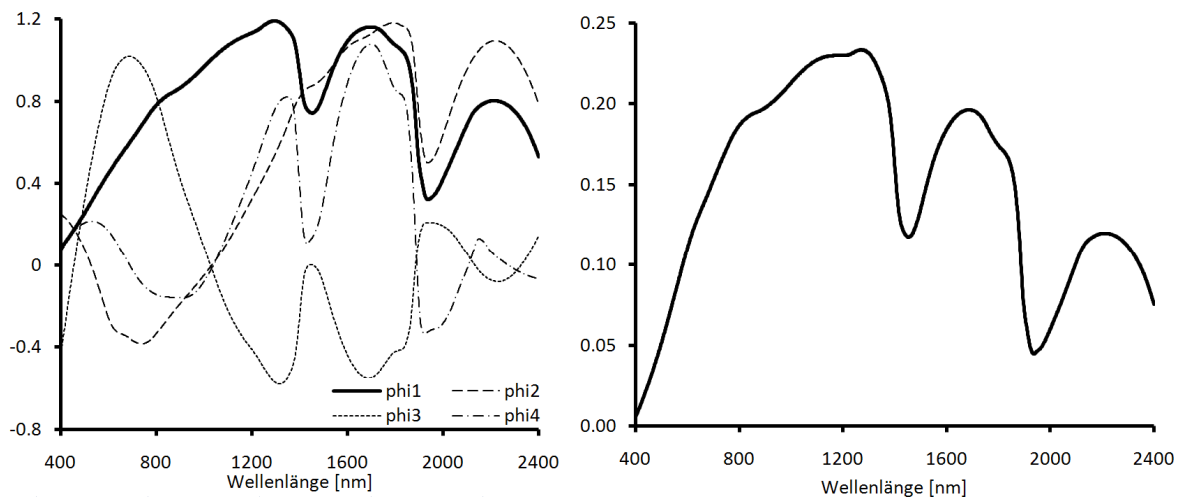
Die Vorgehensweise des Modells bei der Berechnung der Bestandsreflexion beruht auf einer Aufteilung des Bestands in vier Komponenten: Sonnenbeleuchtete Kronen, beschattete Kronen, sonnenbeleuchtete Bodenvegetation und beschattete Bodenvegetation. Als Kronenform können Rotationsellipsoide oder Kegel mit einem Zylinder darunter verwendet werden. Blätter und Äste im Kronenvolumen werden als gleichmäßig verteilt und sphärisch orientiert angenommen.

Das Modell arbeitet im Wellenlängenbereich von 400 bis 2400 nm mit einer spektralen Auflösung von 1 nm, wobei frei gewählt werden kann, für welche Wellenlängen Reflexionswerte berechnet werden. Bei der Reflexionsmodellierung kann jede Einstrahlungs- und Beobachtungsrichtung simuliert werden. Abbildung 55 zeigt als Beispiel ein mit FRT erzeugtes Reflexionsspektrum eines Waldbestands für Blickrichtungen von  $-80^\circ$  bis  $80^\circ$  entlang der *Principal Plane* (vgl. Abbildung 56) bei einem Beleuchtungswinkel von  $40^\circ$ , zu erkennen am „Hot Spot“ bei  $-40^\circ$ . Der Hot Spot ist ein Bereich deutlich erhöhter Reflexion, der entsteht, wenn die Lichtquelle genau in die Blickrichtung strahlt. In diesem Fall sind keine Schatten, sondern nur beleuchtete Vegetationselemente sichtbar, wodurch der beobachtete Bestand heller erscheint als bei anderen Beleuchtungs- oder Beobachtungsgeometrien. Der Beleuchtungswinkel wird, anders als in Abbildung 56 dargestellt, als Sonnenzenitwinkel angegeben, also  $90^\circ - \text{Solar elevation}$ .



**Abbildung 56:** Blickwinkel, Sonnenhöhe und relativer Azimut. Die *Principal Plane* wird von der Sonne, ihrem gedachten Fußpunkt und dem beobachteten Objekt aufgespannt. Quelle: LILLESAND & KIEFER (2000)

### 5.2.1 Modellierung der Bodenreflexion in FRT



**Abbildung 57:** Links: Die vier Price-Vektoren; aus Linearkombination dieser Basis-Vektoren kann ein Boden-Reflexionsspektrum zusammengesetzt werden. Rechts: Bodenspektrum aus Price-Vektoren mit den voreingestellten Gewichten.

Die Modellierung der Bodenreflexion im FRT-Modell ist recht einfach gehalten. Die spektrale Verteilung der Bodenreflexion hängt von einer großen Zahl von Bodenparametern ab (KUUSK 1994). PRICE (1990) hat die Reflexionsspektren von über 500 Böden im Wellenlängenbereich von 0,55 bis 2,32  $\mu\text{m}$  analysiert und herausgefunden, dass trotz der großen Zahl möglicher Einflussgrößen 99,6% der Varianz durch vier Basisvektoren erklärt werden kann (Abbildung 57) und 94% der Varianz allein durch die beiden ersten Basisvektoren. Das gewünschte Bodenspektrum kann durch Linearkombination der vier Basisvektoren erzeugt werden. In der Inputdatei des FRT-Modells werden die vier Gewichte der Basisvektoren angegeben. In der Voreinstellung werden die Vektoren mit (0,217, -0,05, 0, 0) gewichtet. Dabei ergibt sich das in Abbildung 57 rechts dargestellte Reflexionsspektrum.

### 5.2.2 Bedienung des Modells FRT

Das Programm wird als Fortran-Quelltext geliefert. Dieser kann mit einem Compiler, z. B. GNU g77, zu einem ausführbaren Programm übersetzt und dann in einer Kommandozeile oder einer Batchdatei mit dem Befehl `frt inputfile outputfile` aufgerufen werden.

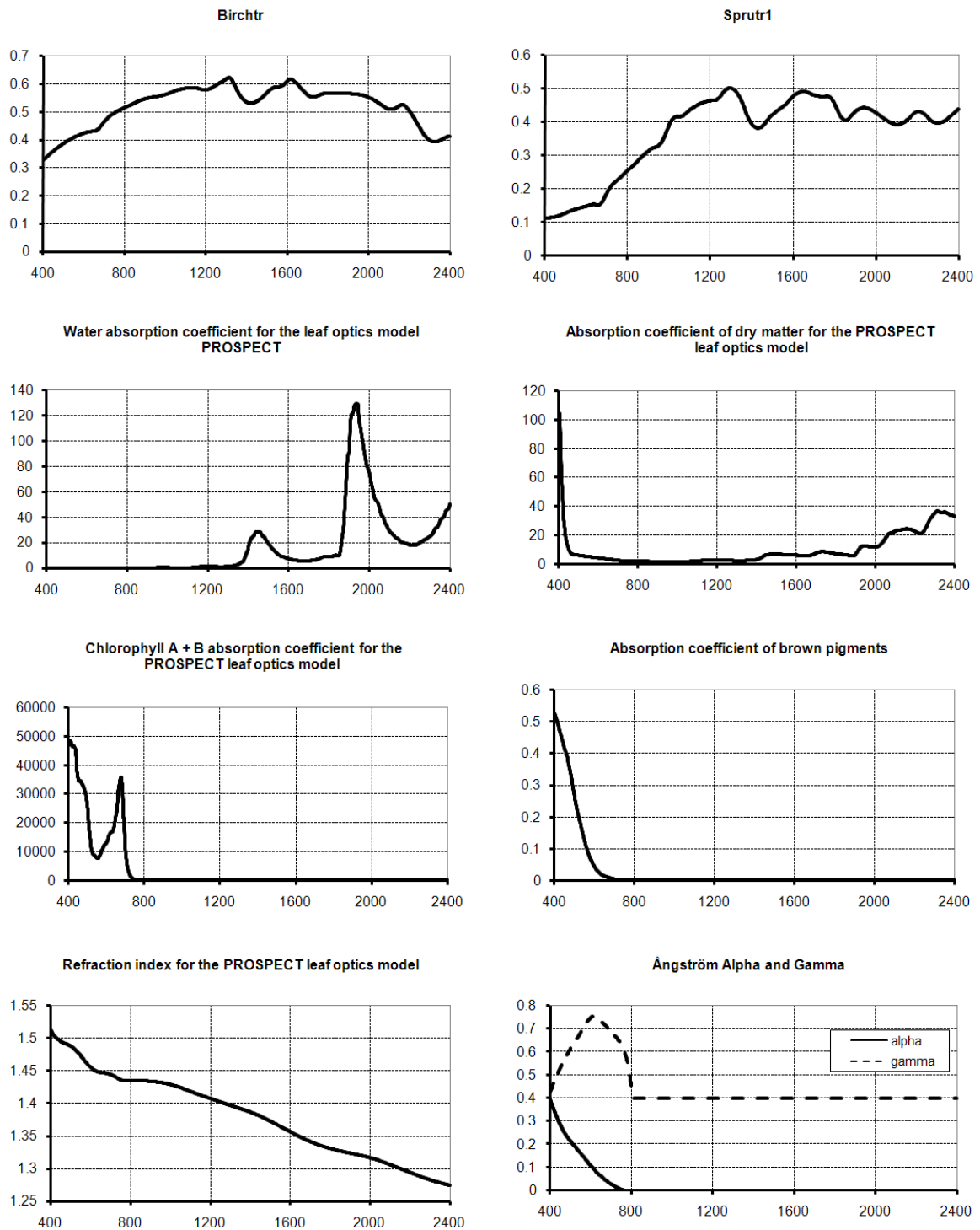
Über die Inputdatei wird das Modell gesteuert; hier können alle Größen angegeben werden, die einen Einfluß auf das Ergebnis haben (KUUSK & NILSON 2005). Eine typische Inputdatei und die einzelnen Modellparameter werden in Anhang F.1 dargestellt und erläutert.

#### Parameterdateien

Die Reflexionsspektren der Rinde von Birken und Fichten, die Absorptionsspektren von Chlorophyll, Wasser, Blatttrockenmasse und braunen Blattpigmenten, die spektrale Verteilung des Refraktionsindex sowie die Ångströmparameter sind, ebenso wie die Price-Vektoren, in externen Parameterdateien gespeichert. Die mit FRT gelieferten Parameterdateien sind in Ab-



Abbildung 58 abgedruckt. Sie können auch durch eigene Messungen, beispielsweise der Rindenreflexion, ersetzt werden.



**Abbildung 58:** Parameterdateien des Modells FRT

Die wellenlängenabhängigen Parameter  $\alpha_o(\lambda)$  und  $\gamma(\lambda)$  (Abbildung 58, unten rechts, MCCARTNEY 1978) bestimmen gemeinsam mit der optischen Dicke  $\tau$  das Verhältnis zwischen diffuser ( $D_\lambda$ ) und gesamtener ( $Q_\lambda$ ) Einstrahlung im Modell MCRM2. Das Verhältnis ist nach KUUSK (1994)

$$D_\lambda/Q_\lambda = \alpha_0(\lambda) + \gamma(\lambda) \cdot \tau(\lambda), \quad (5-2)$$

wobei  $\tau(\lambda) = \beta \lambda^{-\kappa}$  mit  $\kappa \approx 1.4$  ist.  $\beta$  ist der Ångström-Trübungsfaktor (vgl. Anhang B.1).

## Die Outputdatei

Eine beispielhafte Outputdatei des Modells FRT ist in Anhang 0 abgedruckt. Hier werden zunächst die Eingangsgrößen wiederholt und mit dem Zeichen „#“ als Kommentar ausgezeichnet. Da mehrere Baumtypen gemeinsam modelliert werden können, gibt es nach der Darstellung der Inputparameter der einzelnen Baumtypen noch eine Zusammenfassung. Am Ende folgt eine fünfspaltige Darstellung der Modellierungsergebnisse. Die erste Spalte enthält die Wellenlängen in nm, die zweite die Reflexion in Richtung des Sensors. Diese Spalte ist das Hauptergebnis, das im Folgenden weiterverwendet wird. Die dritte Spalte gibt die nach unten gerichtete Strahlung an. Spalte 4 enthält die Bodenreflexion und Spalte 5 das Verhältnis der direkten an der gesamten Einstrahlung für die dargestellten Wellenlängen.

### 5.2.3 Sensitivitätsanalyse

Um zunächst zu klären, welche Parameter einen großen Einfluss auf das resultierende Reflexionsspektrum haben und welche eher vernachlässigt werden können, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dabei wurde, wie bei den vorher beschriebenen Sensitivitätsanalysen der Blattmodelle, jeweils einer der in Anhang F.1 genannten Parameter variiert, während die anderen konstant blieben. Insgesamt wurden 36 Parameter betrachtet. Als Blattreflexionsmodell kam PROSPECT-2 zum Einsatz. Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse sind in den Abbildungen 59 und 60 dargestellt.

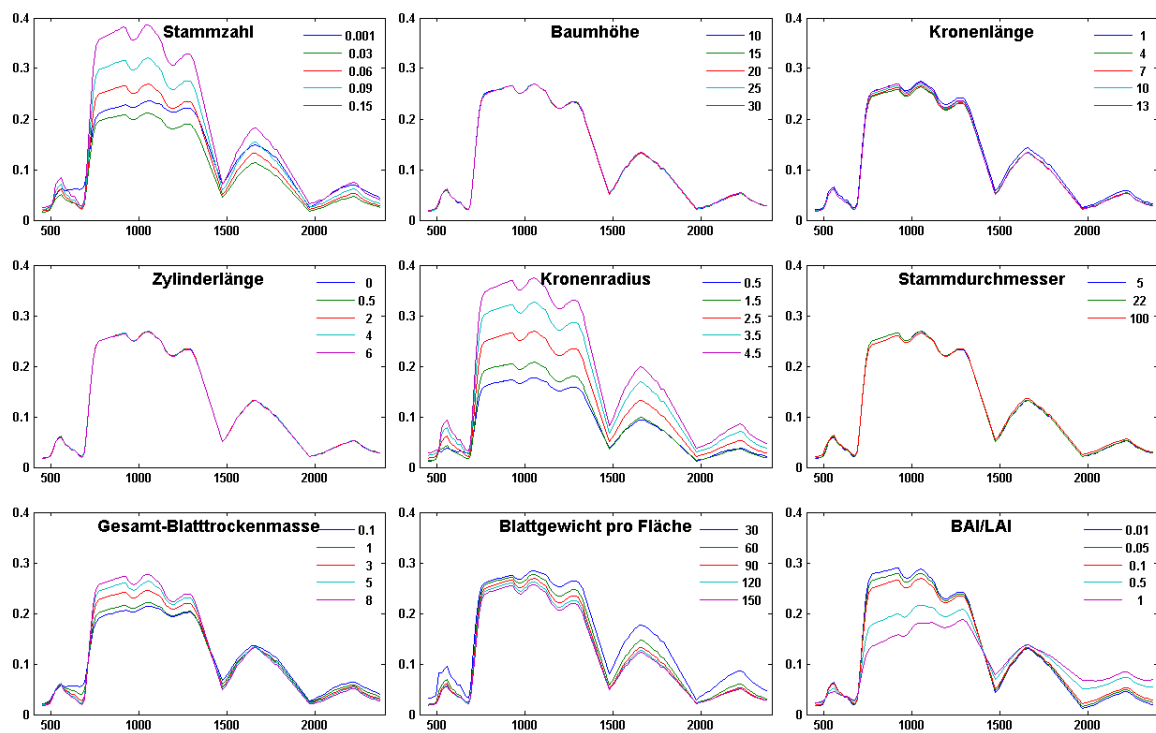


Abbildung 59: Sensitivitätsanalyse des Reflexionsmodells FRT, Teil 1.

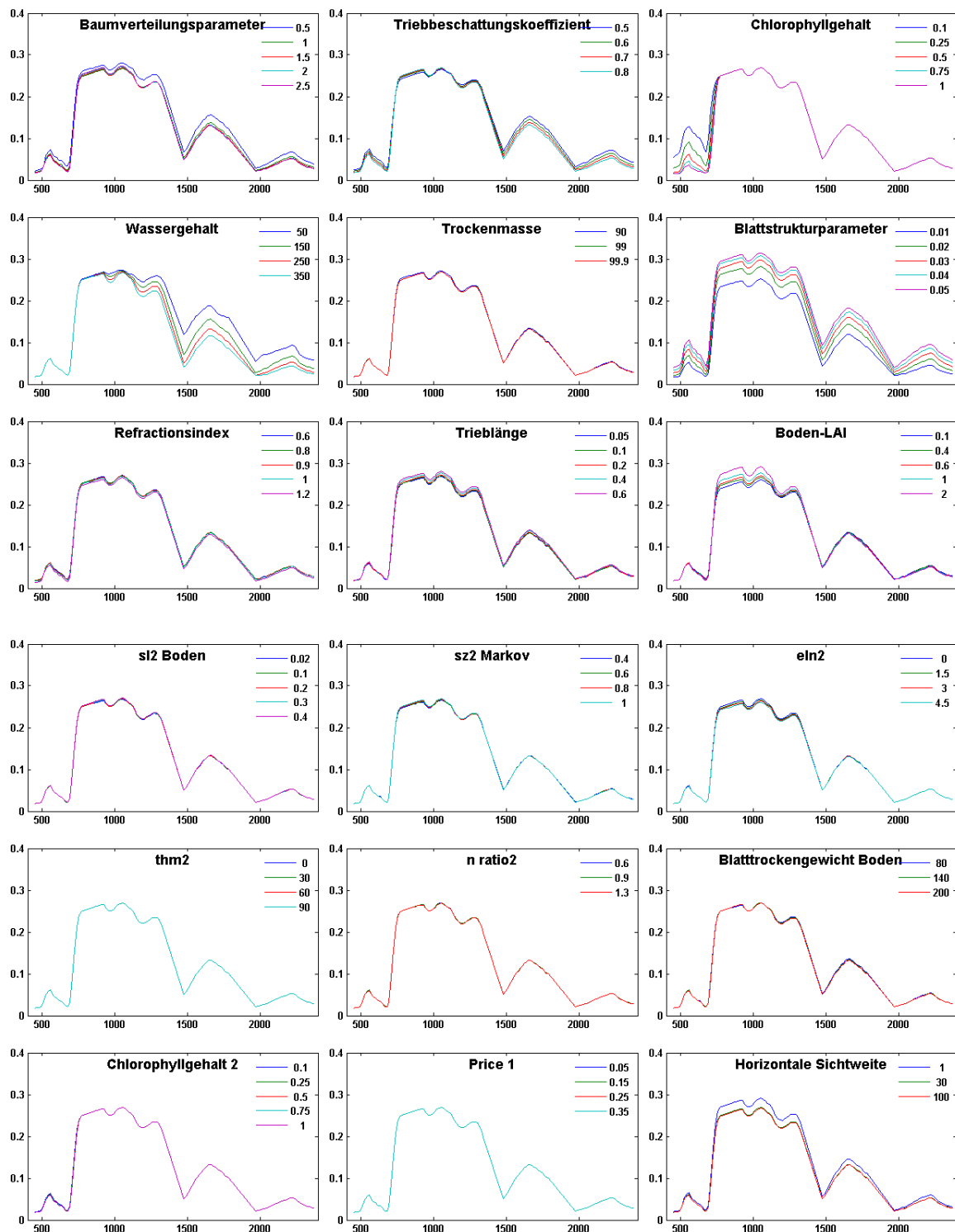


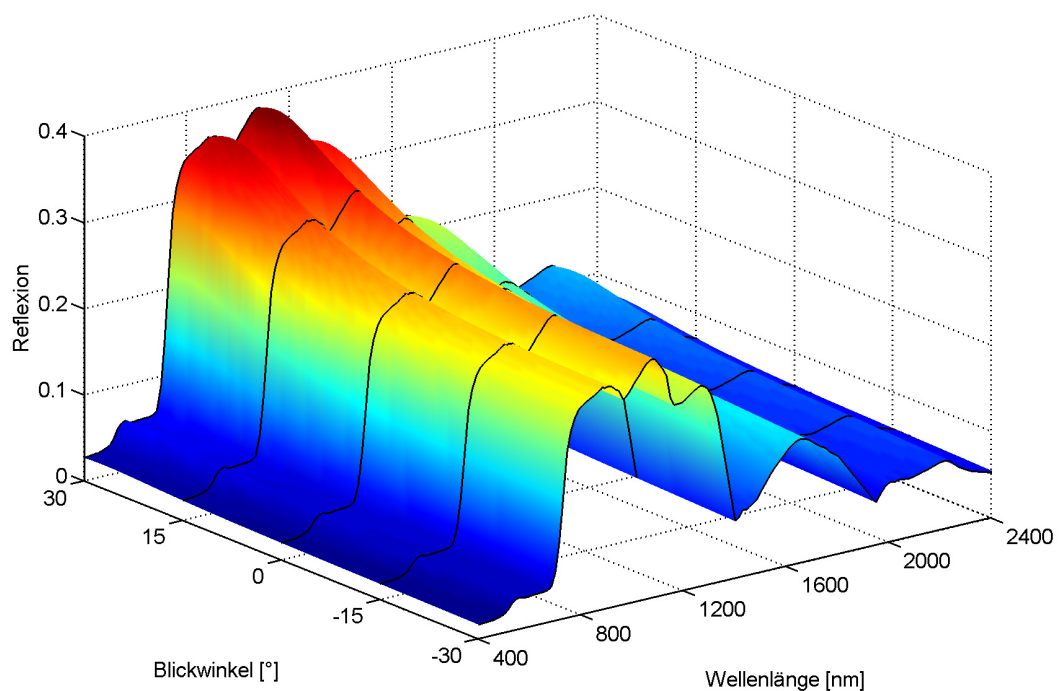
Abbildung 60: Sensitivitätsanalyse des Reflexionsmodells FRT, Teil 2.

Den größten Einfluss auf das resultierende Reflexionsspektrum haben Variablen, die die Menge der für den Sensor sichtbaren photosynthetisch aktiven Biomasse, also der Blätter und Nadeln, beeinflussen. Dies sind die Bestockungsdichte, der Kronenradius, die Blattmasse pro Baum und das Verhältnis von BAI zu LAI (Rindenfläche zu Blattfläche). Auch der Baumverteilungsparameter gehört zu dieser Gruppe von Variablen: Bei geklumpten Bäumen gibt es

mehr Lücken zwischen den Bäumen als bei gleichmäßig verteilten, so dass bei gleichmäßig verteilten Bäumen bei gleichem LAI mehr Blätter für den Sensor sichtbar sind. Ebenfalls einen großen Einfluss haben blattchemische Variablen der Kronenschicht wie Chlorophyllgehalt und Wassergehalt und Parameter, die die Blattstruktur beschreiben wie der Prospect-Strukturparameter und das Blattgewicht pro Fläche. Der LAI der Bodenvegetation hat einen umso größeren Einfluss, je geringer der Bedeckungsgrad der Baumschicht ist. Die in der Sensitivitätsanalyse gewählten Werte entsprechen einem leicht lückigen Bestand, so dass ein erhöhter Wert des LAI der Krautschicht recht deutlich im resultierenden Spektrum sichtbar wird.

Viele andere Parameter haben, zumindest bei den gewählten Randbedingungen, keinen sichtbaren Einfluss auf das resultierende Spektrum, obwohl sie sehr stark variiert wurden. Diese Werte werden bei der Invertierung des Bestandsreflexionsmodells FRT konstant gelassen.

### 5.3 Das Bestandsreflexionsmodell FLIM/INFORM



**Abbildung 61:** Mit FLIM/INFORM erzeugtes multiangulares Bestandsreflexionsspektrum für die Aufnahmesituation des HyMap-Streifens Idarwald 2003.

Ein deutlich einfacheres Bestandsreflexionsmodell als FRT ist FLIM/INFORM. Mit diesem Modell kann die Reflexion aus relativ wenigen Parametern modelliert werden, wodurch sich auch die Inversion einfacher gestaltet.

Das *Forest Light Interaction Model* FLIM (ROSEMA et al. 1992) modelliert die Reflexion von Forstbeständen, indem die reflektierende Fläche in vier Teilflächen aufgeteilt wird:

- Beleuchtete Vegetation,
- Beschattete Vegetation,
- Beleuchteter Boden und
- Beschatteter Boden.

Die jeweiligen Flächenanteile werden aus strukturellen Forstparametern und aus der Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie berechnet. Außerdem wird die Transmissivität der Kronen berücksichtigt. Dabei werden für die Bodenreflexion und für Reflexionswerte einer beleuchteten Krone mit unendlichem Blattflächenindex (*infinite crown*) dem Modell Werte vorgegeben, aus denen die Gesamtreflexion für die betrachtete Situation berechnet wird. ROSEMA et al. (1992) verwenden hier aus Bilddaten abgeleitete Werte. HU et al. (2000) und FERNANDES et al. (2002) verwenden FLIM und eine Variante namens FLIM-CLUS zur Schätzung des Blattflächenindex. Dabei dienen ebenfalls Bildpixel zur Bestimmung der Reflexion der infiniten Krone und des Hintergrundes. HU et al. (2000) schlagen als Alternative vor, die Reflexion der infiniten Kronen mit dem Modell SAIL zu modellieren.

ATZBERGER (2000a, b) entwickelte das Modell zum *Invertible Forest Reflectance Model* INFORM weiter. Dabei werden der Reflexionsgrad eines Forstbestands mit sehr hohem LAI und der Reflexionsgrad des Unterwuchses mit dem Modell SAILH (VERHOEF 1984, 1985) berechnet, anstatt sie aus Bilddaten zu extrahieren. Die Reflexion und Transmission der Nadeln oder Blätter kann mit LIBERTY oder PROSPECT modelliert werden. Eine ähnliche Modellkombination aus PROSPECT, SAILH und FLIM verwenden auch ZARCO-TEJADA et al. (2004).

SAIL (*Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves*, VERHOEF 1984) ist eines der ersten Bestandsreflexionsmodelle. Es basiert auf einem von SUITS (1972) entwickelten Modell und berechnet die bidirektionelle Reflexion eines als trübem Medium angesehenen Pflanzenbestands. Während das Suits-Modell nur horizontale oder vertikale Blätter zulässt, können bei SAIL Blatthaltungsverteilungen angegeben werden (VERHOEF et al. 2007). SAILH ist eine weiterentwickelte Version, in der der Hot-Spot-Effekt berücksichtigt wird. Die Inputparameter von SAILH sind Reflexions- und Transmissionsgrad der Blätter ( $\rho$  und  $\tau$ ), LAI, mittlerer Blatthaltungswinkel ( $ALA$ ), Beobachtungszenitwinkel ( $\theta_o$ ), Einstrahlungszenitwinkel ( $\theta_s$ ), relativer Azimutwinkel zwischen Sonne und Beobachter ( $\Psi$ ), Anteil der diffusen Einstrahlung ( $skyI$ ) und der Hot-Spot-Parameter ( $hot$ ). Der Hot-Spot-Parameter ist definiert als das Verhältnis der mittleren Blattgröße zur Bestandshöhe (VERHOEF 1985, JACQUEMOUD et al. 2009).

SCHLERF & ATZBERGER (2006) invertierten INFORM für Fichtenbestände im Idarwald. Für die Modellierung von Nadelreflexion und -transmission wurde dabei LIBERTY verwendet. Die Invertierung wurde mit Hilfe von künstlichen Neuronalen Netzen durchgeführt. SCHLERF et al. (2007) haben INFORM mit zwei anderen Bestandsreflexionsmodellen (FRT und SLC) verglichen und die modellierten Werte mit Chris/Proba-Daten validiert. Dabei konnte INFORM ähnlich gut wie die deutlich komplizierteren anderen Modelle winkelabhängig Reflexionswerte schätzen.

In der vorliegenden Arbeit wurde FLIM für Laubwaldbestände mit PROSPECT-4 und für Nadelwald mit LIBERTY kombiniert.

### 5.3.1 Modellbeschreibung

FLIM berechnet die Bestandsreflexion  $R$  in einem bestimmten Spektralkanal laut ROSEMA et al. (1992) und SCHLERF & ATZBERGER (2006) als

$$R = R_C \cdot C + R_G \cdot G, \quad (5-3)$$

wobei  $R_C$  die Kronenreflexion bei unendlicher Kronenausdehnung und  $R_G$  die Hintergrundreflexion ist. In FLIM werden  $R_C$  und  $R_G$  als „Endmember-Spektren“ aus einem Bild bestimmt.  $C$  ist der „Kronenfaktor“

$$C = (1 - T_s \cdot T_0) \cdot c_s \cdot c_0, \quad (5-4)$$

wobei  $T_s$  die mittlere Kronentransmissivität in Richtung der Sonneneinstrahlung und  $T_0$  die mittlere Kronentransmissivität in Beobachtungsrichtung ist.  $T_s$  und  $T_0$  hängen exponentiell mit dem LAI zusammen.  $c_s$  und  $c_0$  sind die Bedeckungsgrade der Kronen in Beleuchtungs- und Blickrichtung.  $G$  ist der „Bodenfaktor“

$$G = F_a \cdot T_s \cdot T_0 + F_b \cdot T_0 + F_c \cdot T_s + F_d, \quad (5-5)$$

wobei  $F_x$  jeweils Bodenflächenanteile sind.  $F_a$  steht für Baumkronen mit beschattetem Hintergrund,  $F_b$  für Baumkronen mit beleuchtetem Hintergrund,  $F_c$  für beschatteten freien Raum und  $F_d$  für beleuchteten freien Raum. Die Anteile  $F_x$  werden aus  $c_s$  und  $c_0$  unter Berücksichtigung der Korrelation zwischen  $c_s$  und  $c_0$  berechnet (ROSEMA et al. 1992).

Die beobachtete Bodenbedeckung durch Kronen  $c_0$  unter dem Beobachtungszenitwinkel  $\theta_0$  ist durch

$$c_0 = 1 - e^{\frac{-k \cdot SD}{\cos \theta_0}} \quad (5-6)$$

gegeben, wobei  $SD$  die Anzahl der Bäume pro Hektar (*stem density*) ist und  $k$  eine Konstante, die die mittlere horizontale Fläche einer Krone in Hektar angibt. Entsprechend wird  $c_s$ , die Bodenabdeckung durch Schatten, für den Einstrahlungswinkel  $\theta_s$  definiert:

$$c_s = 1 - e^{\frac{-k \cdot SD}{\cos \theta_s}}. \quad (5-7)$$

Die Kronenflächenkonstante  $k$  [ha] berechnet sich unter Annahme kreisrunder Kronen aus dem Kronendurchmesser  $CD$  [m] nach

$$k = \frac{\pi \cdot (0.5 \cdot CD)^2}{10\,000}. \quad (5-8)$$

In FLIM wird angenommen, dass die Kronentransmissivitätsterme  $T_s$  und  $T_0$  einfache exponentielle Funktionen des LAI sind. Die Effekte der Blattgeometrie und der optischen Eigenschaften der Blätter werden vernachlässigt. Aus diesen Gründen wird in INFORM SAIL oder SAILH verwendet, um die bidirektionelle Transmission des Vegetationsbestands zu berechnen. Für gegebene oder mit PROSPECT oder LIBERTY berechnete Blattreflexion und -transmission  $\rho$  und  $\tau$  berechnet SAILH die Kronentransmissivitätsterme:

$$T_0 = f_{SAIL}(LAI, ALA, \tau, \rho, \theta_0, \Psi, skyl, hot) \quad (5-9)$$

$$T_s = f_{SAIL}(LAI, ALA, \tau, \rho, \theta_s, \Psi, skyl, hot). \quad (5-10)$$

Die Hintergrundreflexion  $R_G$  (Gleichung 5-3) wird ebenfalls mit Werten für Blattreflexion und -transmission aus PROSPECT oder LIBERTY in SAILH berechnet; hier müssen Blattflächenindex und Blatthaltungswinkel des Unterwuchses ( $LAI_U$  und  $ALA_U$ ) eingesetzt werden:

$$R_G = f_{SAIL}(LAI_U, ALA_U, \tau, \rho, \theta_0, \Psi, skyl, hot). \quad (5-11)$$

Ebenso wird verfahren mit der Reflexion der unendlichen Krone  $R_C$ ; hier wird  $LAI_{inf}$  auf einen Wert  $\geq 15$  gesetzt:

$$R_C = f_{SAIL}(LAI_{inf}, ALA, \tau, \rho, \theta_0, \Psi, skyl, hot). \quad (5-12)$$

Die Blattreflexionen und -transmissionen werden in PROSPECT-4 als Funktion des Strukturparameters  $N$ , des Gehalts an Chlorophyll a und b  $C_{ab}$ , des Wassergehalts  $C_w$  und des Gehalts an Trockenmasse  $C_m$  berechnet (FERET et al. 2008):

$$\tau = f_{PROSPECT}(N, C_{ab}, C_w, C_m) \quad (5-13)$$

$$\rho = f_{PROSPECT}(N, C_{ab}, C_w, C_m). \quad (5-14)$$

Zusammengenommen wird die Reflexion des Bestandes von INFORM als Funktion von internen Bestandsparametern, internen Blattparametern, der Reflexion des Bodens und externen Parametern berechnet (SCHLERF & ATZBERGER 2006):

$$R = f_{INFORM} \left( \begin{array}{l} SD, CD, H, LAI, ALA, LAI_{inf}, LAI_U, ALA_U, \rho_{Boden} \\ N, C_{ab}, C_w, C_m, \theta_s, \theta_0, \Psi, skyl, hot \end{array} \right). \quad (5-15)$$

Für die Bodenreflexion wird ein relativ helles Spektrum vorgegeben. Dieses kann durch einen Faktor, mit dem jeder Wert des Spektrums multipliziert wird, abgedunkelt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde der Faktor 0.6 verwendet.

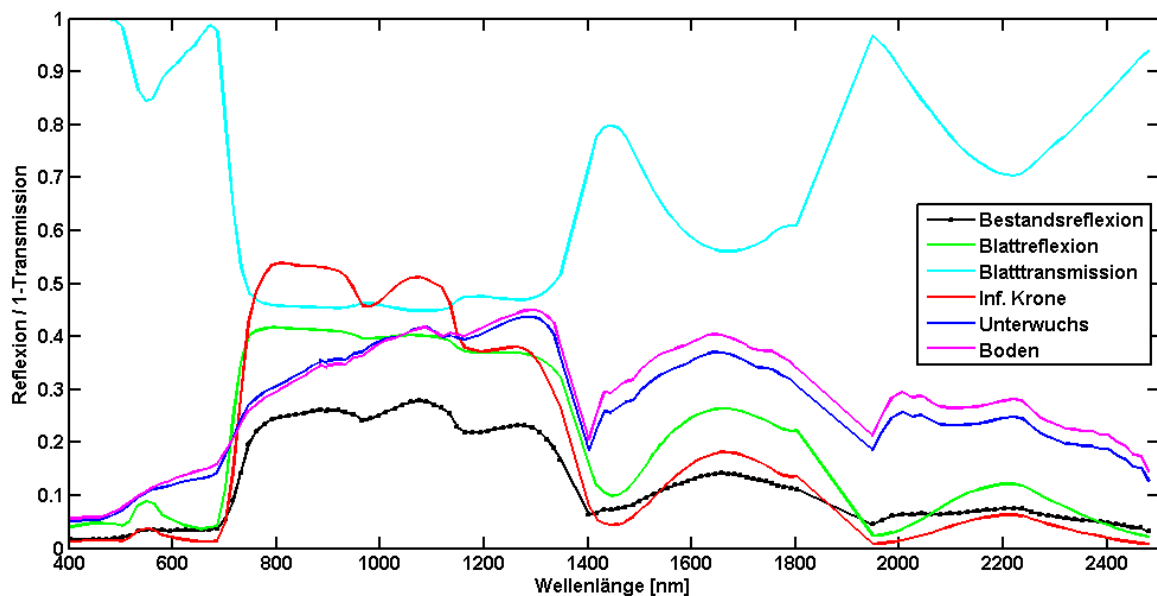
### 5.3.2 Bedienung des Modells

INFORM liegt als Matlab-Funktion vor. In der ursprünglichen Version konnte der Blatt- oder Nadel-Strahlungstransfer mit PROSPECT-1 oder LIBERTY berechnet werden, für die vorliegende Arbeit wurde für die Modellierung der Blattreflexion die aktuellere Version PROSPECT-4 eingesetzt.

Die Funktion gibt die Reflexion des Bestands  $R$ , die Reflexion des Unterwuchses  $R_G$ , die Reflexion der unendlichen Krone  $R_C$ , den Bedeckungsgrad  $c_0$ , den Kronenfaktor  $C$ , den Bodenfaktor  $G$ , die Blattreflexion und -transmission  $\rho$  und  $\tau$  sowie die Transmission der Kronenschicht in Blick- und Beleuchtungsrichtung  $T_0$  und  $T_s$  an. Abbildung 62 zeigt die Ausgabespektren und die Bodenreflexion für die Wellenlängen von HyMap und die in Tabelle 9 aufgeführten Eingabeparameter.

**Tabelle 9:** Eingangsparameter für die Sensitivitätsanalyse von PROSPECT/FLIM/INFORM und für die Spektren in Abbildung 62

Symbol	Name	Wert
$SD$	Stammdichte [ $\text{ha}^{-2}$ ]	650
$CD$	Kronendurchmesser [m]	2
$H$	Baumhöhe [m]	20
$LAI_s$	Einzelbaum-Leaf Area Index [ $\text{m}^2/\text{m}^2$ ]	7
$ALA$	Mittlerer Blatthaltungswinkel [ $^\circ$ ]	55
$LAI_{inf}$	Infiniter Leaf Area Index [ $\text{m}^2/\text{m}^2$ ]	15
$LAI_U$	Leaf Area Index des Unterwuchses [ $\text{m}^2/\text{m}^2$ ]	0.1
$ALA_U$	Blatthaltungswinkel des Unterwuchses [ $^\circ$ ]	55
$N$	PROSPECT-Strukturparameter	1.2
$C_{ab}$	Chlorophyllgehalt [ $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ ]	40
$C_w$	Wassergehalt [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]	0.015
$C_m$	Gehalt an Trockenmasse [ $\text{g}/\text{cm}^2$ ]	0.004
$\theta_s$	Sonnenzenitwinkel [ $^\circ$ ]	45
$\theta_o$	Beobachtungszenitwinkel [ $^\circ$ ]	0
$\psi$	Azimutwinkel zwischen Beleuchtung und Beobachtung [ $^\circ$ ]	0
$skyl$	Himmelslichtanteil	0.1
$hot$	Hot-Spot-Parameter	0


**Abbildung 62:** Ausgabespektren von INFORM

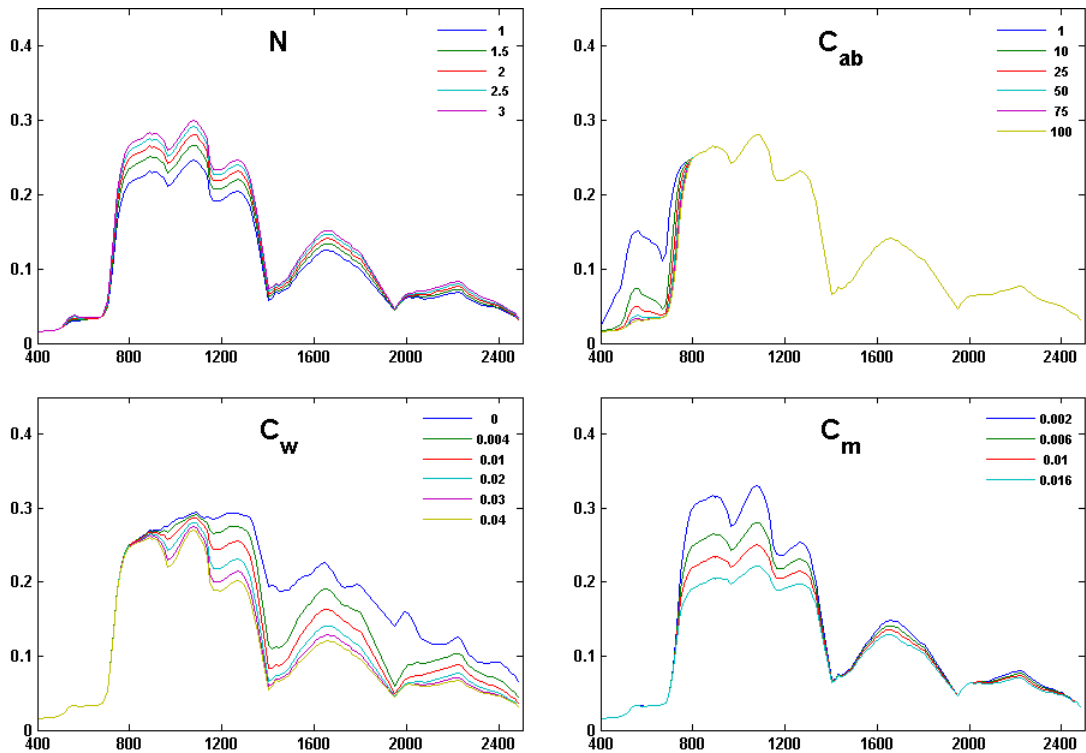
### 5.3.3 Sensitivitätsanalyse

Um die Sensitivität des kombinierten PROSPECT-4/SAILH/FLIM/INFORM-Modells zu testen, wurden die einzelnen Eingangsgrößen variiert. Die restlichen Eingangsgrößen wurden jeweils auf den in Tabelle 9 genannten Werten stabil gelassen.

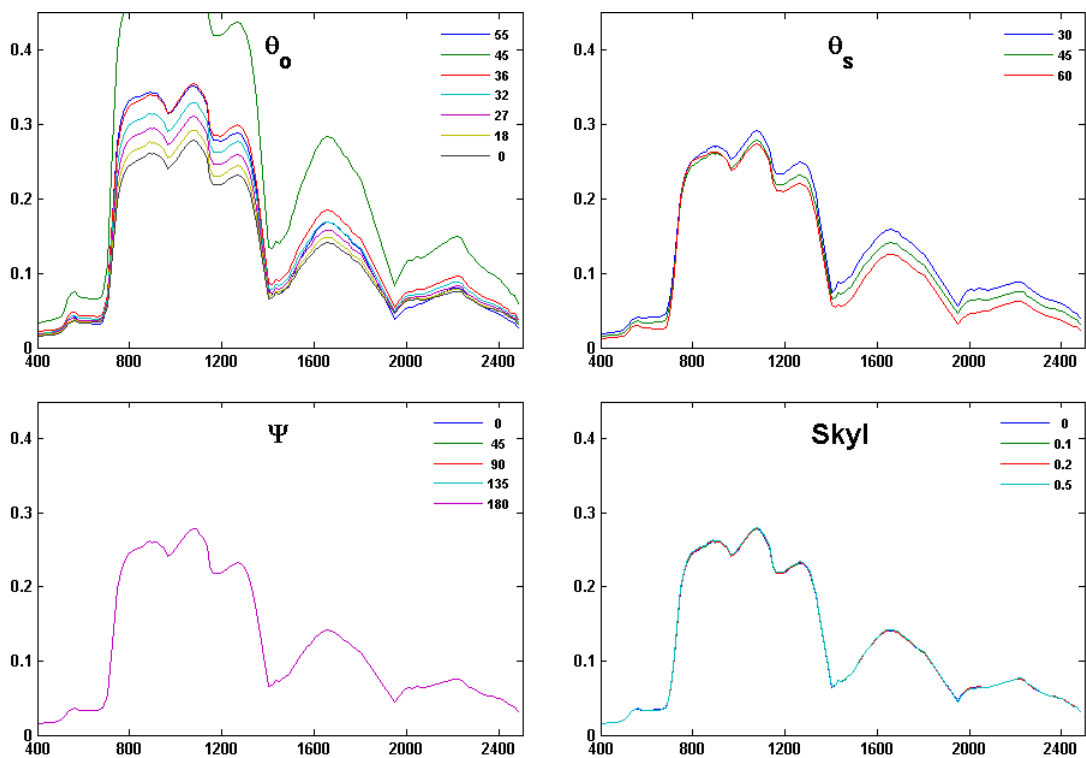


Abbildung 63 zeigt den Einfluss der PROSPECT-Parameter auf das Bestandsreflexionsspektrum. Die Parameter wurden wie in Abschnitt 5.1 gewählt. Im Vergleich zur reinen Blattreflexion sind die Effekte der variierten Eingangsgrößen kleiner, da hier das Blattspektrum mit Hintergrundspektren und Schatten vermischt wird. Wie zu erwarten, ist der Einfluss des Chlorophyllgehalts nur im Wellenlängenbereich des sichtbaren Lichts und in der Red Edge sichtbar, während der Wassergehalt das Spektrum im Infrarotbereich beeinflusst. Der Strukturparameter wirkt sich im gesamten Bereich aus, der Trockenmassegehalt ebenso. Dieser ist in seiner Auswirkung bei INFORM stärker als bei PROSPECT-4 alleine. Die Sensitivität des kombinierten LIBERTY/SAILH/FLIM/INFORM-Modells auf Änderungen der LIBERTY-Parameter ist nicht gesondert dargestellt.

Abbildung 64 zeigt die Auswirkung der Variation der externen Parameter: der Beleuchtungs- und Beobachtungsgeometrie und des Himmelslichtanteils. Als Werte des Beobachtungswinkels  $\theta_o$  wurden der Beobachtungswinkel des multiangularen Sensors CHRIS (BARNESLEY et al. 2004) und einige Zwischenwerte gewählt. Hier zeigt sich ein deutlicher Unterschied zwischen Nadirbeobachtung und Schrägsicht, mit maximaler Reflexion bei  $45^\circ$  Beobachtungswinkel (hot spot). Der Unterschied zwischen den beiden Schrägsichtswinkeln von CHRIS,  $36^\circ$  und  $55^\circ$ , ist sehr gering. Die Winkelabhängigkeit und der Hot-Spot-Effekt können in Abbildung 55 (für Beobachtungen in der Principal Plane) und Abbildung 61 (etwas abseits der Principal Plane) genauer studiert werden. Der Einfluss des Einstrahlungswinkels  $\theta_s$  ist deutlich geringer, aber in einigen Wellenlängenbereichen durchaus merklich. Der Azimutwinkel  $\Psi$  zwischen Einstrahlungsrichtung und Beobachtungsrichtung (vgl. Abbildung 56) hat bei den verwendeten restlichen Größen überhaupt keinen Einfluss auf das Bestandsreflexionsspektrum. Eine Variation des Himmelslichtanteils  $skyl$  ist ebenfalls im Ergebnis kaum erkennbar.

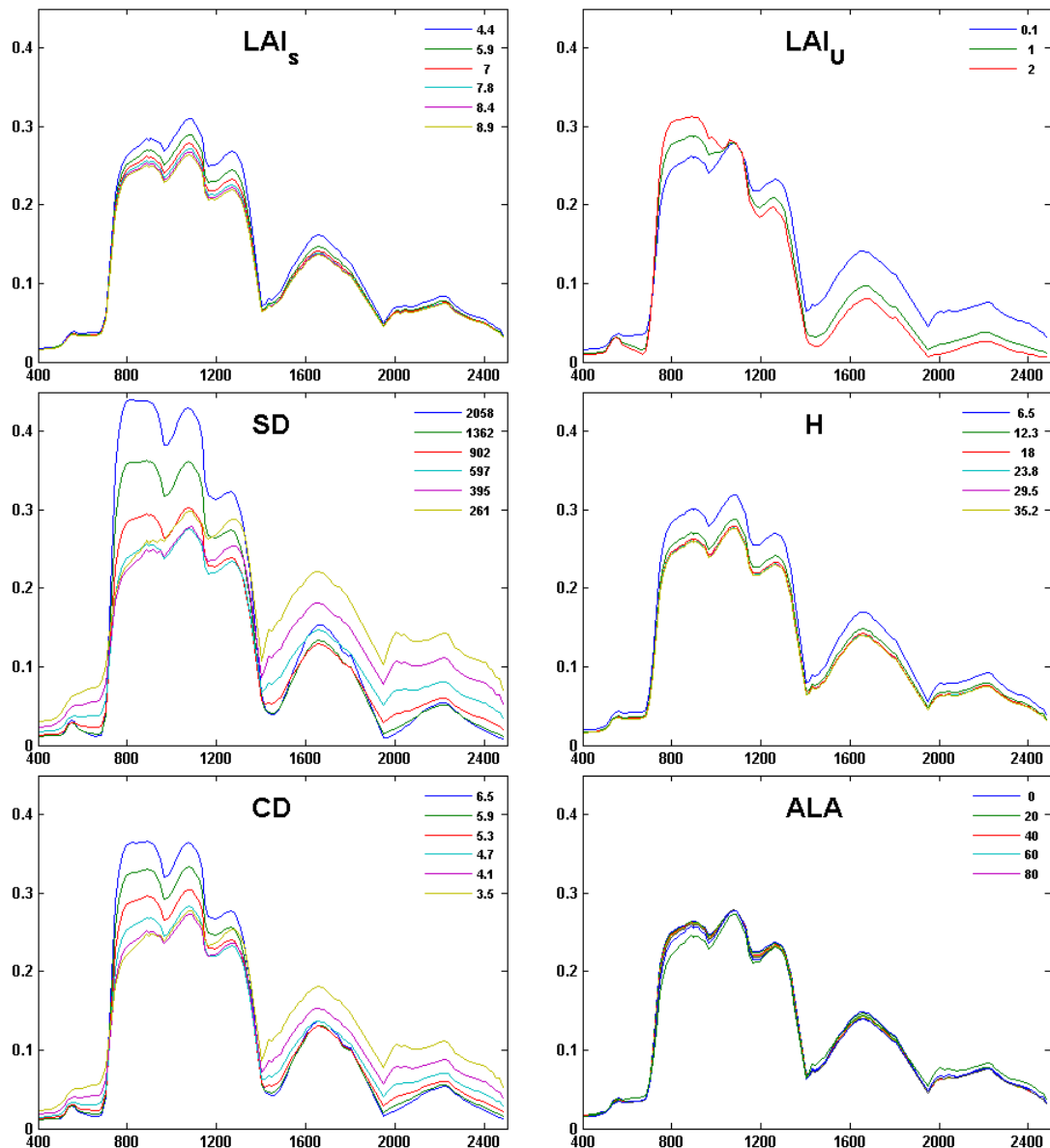


**Abbildung 63:** Variation der PROSPECT-Parameter im kombinierten PROSPECT-4/FLIM/INFORM-Modell



**Abbildung 64:** Variation der externen Parameter

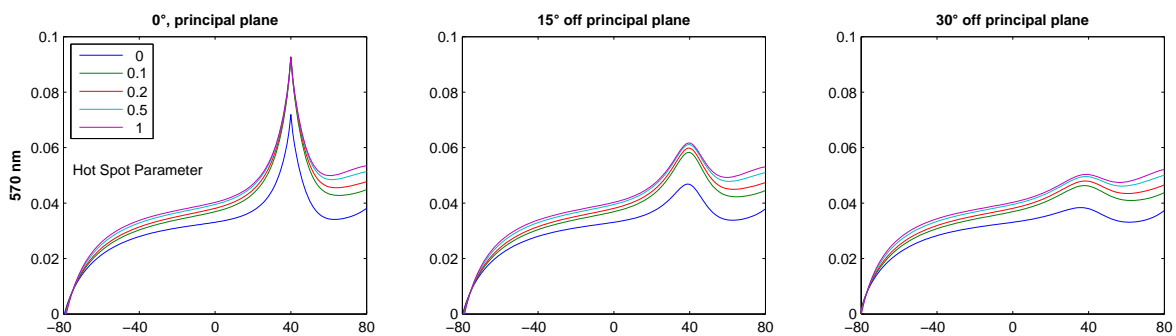
Abbildung 65 stellt den Einfluss der internen Bestandsparameter auf die Bestandsreflexion dar. Hier wurden die Größen der Variablen gemäß den von SCHLERF & ATZBERGER (2006) für Forstbestände mit LAI-Werten zwischen 1.5 und 6.5 gewählten Werten variiert. Der LAI als Eingangswert in INFORM ist immer der Blattflächenindex eines einzelnen Baums, hier als



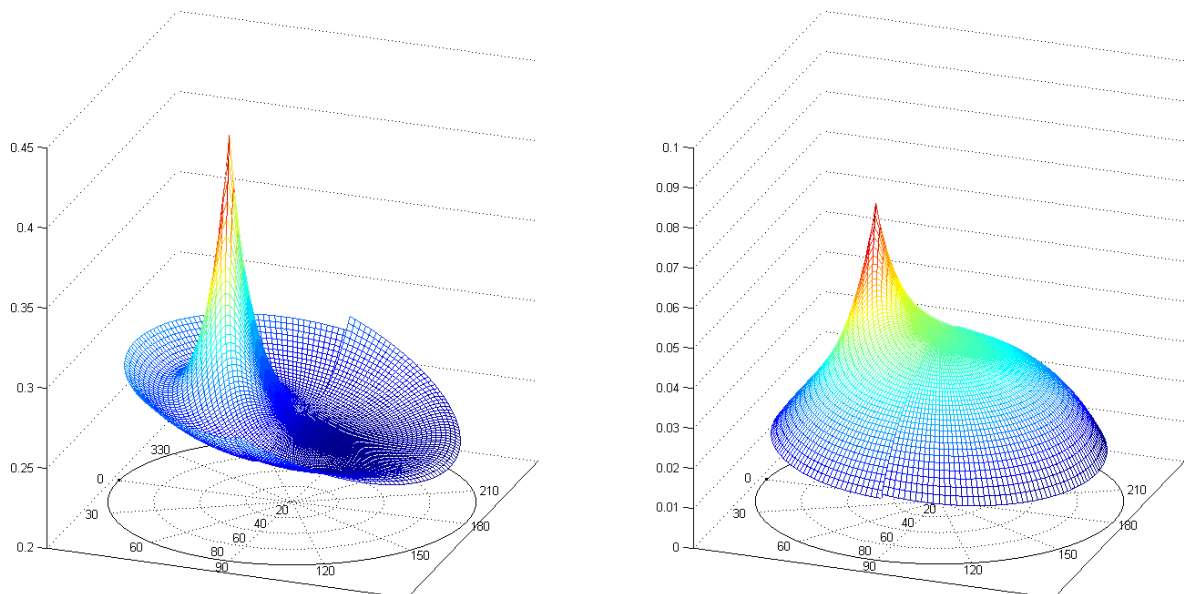
**Abbildung 65:** Variation der internen Bestandsparameter

LAI<sub>s</sub> bezeichnet. Der Bestands-LAI berechnet sich jeweils als Produkt von LAI<sub>s</sub> und dem Bedeckungsgrad  $c_0$ . Der Einfluss des LAI<sub>u</sub> ist trotz des hohen Einzelbaum-LAI von 7 deutlich sichtbar. Dies lässt sich damit erklären, dass der Kronenschlussgrad bei dem gegebenen Kronendurchmesser von 4.5 m bei 650 Bäumen pro Hektar und Nadirsicht nur bei ca. 65% liegt. Bei der Stammdichte *SD* lässt sich ebenfalls beobachten, dass bei großem Bestandslückenanteil der Einfluss des Unterwuchses deutlich sichtbar wird. Hohe Stammdichten dagegen führen zu Bedeckungsgraden um 100% und erhöhen bei stabilem LAI<sub>s</sub> den Bestands-LAI. Der gleiche Effekt tritt bei wachsendem Kronendurchmesser *CD* auf. Die Baumhöhe *H* hat, gerade bei Nadirsicht, keinen großen Einfluss auf das Reflexionsspektrum. Nur eine sehr kleine Baumhöhe, bei der die Blätter auf kleinem Raum komprimiert vorliegen, führt zu einem deutlich sichtbaren Reflexionsanstieg. Der Einfluss des mittleren Blatthaltungswinkels *ALA* ist gering, obwohl er hier über einen sehr großen Wertebereich variiert wird.

Eine genauere Betrachtung verdienen der Hotspot-Parameter und die Abhängigkeit der Reflexion vom relativen Azimutwinkel. Abbildung 66 stellt den Verlauf der mit Inform modellierten Reflexion bei 570 nm Wellenlänge für verschiedene Werte des Hotspot-Parameters und verschiedene Azimutwinkel bei Blickwinkeln zwischen  $-80^\circ$  und  $+80^\circ$  und einem Sonnenzenitwinkel von  $40^\circ$  dar. Deutlich ist zu erkennen, dass die Reflexionsspitze im Hot spot unabhängig vom Wert des Hotspot-Parameters in der Principal Plane sehr spitz ist und bei Blickwinkeln abseits der Principal Plane flacher und runder wird. Die Sonne wird vom Modell als punktförmig angesehen, der restliche Himmel als gleichmäßig hell. Dies führt im Modellergebnis zu einem tendenziell zu spitzen Hot spot, da der Effekt der zirkumsolaren Strahlung nicht abgebildet wird. Die Verteilung der Reflexion im nahinfraroten und im roten Spektralbereich für alle Blick- und Azimutwinkelkombinationen lässt sich Abbildung 67 entnehmen. Bei einer Wellenlänge von 800 nm kann eine sogenannte Bowl-Shape erkannt werden, bei 650 nm eine sogenannte Bell-Shape (KOETZ et al. 2005). Bei beiden dargestellten Wellenlängen ist der Hot Spot deutlich ausgeprägt.



**Abbildung 66:** Variation des Hotspot-Parameters und des relativen Azimuts.

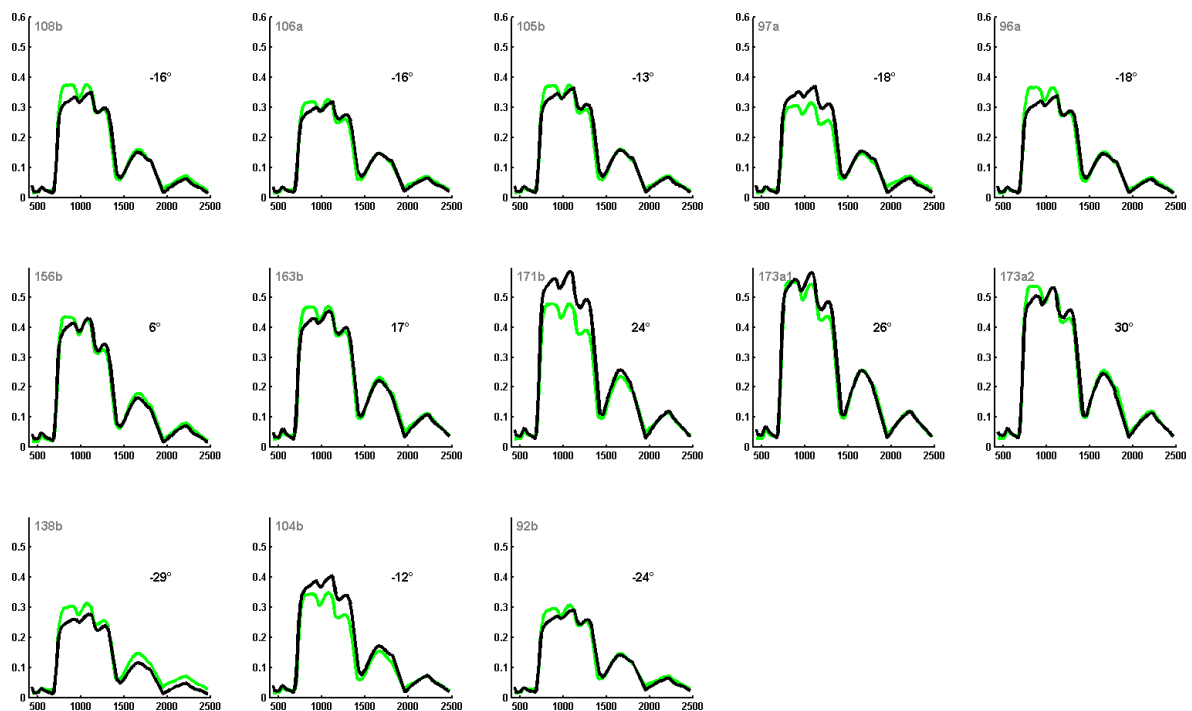


**Abbildung 67:** Verteilung des Reflexionsgrads für Blickwinkel von  $-70^\circ$  bis  $+70^\circ$  und relative Azimutwinkel von  $0^\circ$  bis  $180^\circ$  bei den Wellenlängen  $800\text{ nm}$  (links) und  $650\text{ nm}$  (rechts), modelliert mit INFORM.

### 5.3.4 Vorwärtsmodellierung der Idarwald-Bestände

Um zu testen, ob mit INFORM das Reflexionsverhalten der im Idarwald beprobten Bestände nachgebildet werden kann, wurde das Modell für die Bestände mit aus Laserscanning abgeleiteten Informationen parametrisiert. Dabei wurden die Parameter, die nicht aus den Lidar-Daten abgeleitet werden können, für alle Bestände konstant gelassen. Abbildung 68 zeigt die jeweiligen Bild- und Modellspektren der Buchenbestände.

Aus den Lidar-Daten wurden für die Bestände Stammdichte, Baumhöhe, Bestands-LAI und Bedeckungsgrad abgeleitet. Der Einzelbaum-LAI wurde durch Division von Bestands-LAI und Bedeckungsgrad ermittelt. Der Blickwinkel für jeden Bestand wurde aus seiner Position im Hymap-Bild abgeleitet. Der Hot-Spot-Index wurde aus der Baumhöhe berechnet. Die restlichen Modellparameter wie Chlorophyll- und Wassergehalt, Unterwuchs-LAI, Blatthaltungswinkel und Boden-Reflexionsspektrum wurden für alle Bestände auf die gleichen Werte gesetzt.



**Abbildung 68:** Bild- (schwarz) und Modellspektren (grün) der im Idarwald beprobten Buchenbestände, sowie Blickwinkel.

In der Abbildung ist zu erkennen, dass die meisten Bildspektren gut wiedergegeben werden, dass es dabei allerdings auch zu Über- und Unterschätzungen des Reflexionsgrades kommt. Die in der Nähe des Hotspot liegenden Bestände 171b, 173a1 und 174a2 mit 24°, 26° und 30° Blickwinkel bei einem Sonnenzenitwinkel von 28,5° weisen deutlich höhere Reflexionsgrade als die restlichen Bestände auf. Bei Bestand 171b ist die modellierte Reflexion im Nahinfrarotbereich deutlich niedriger als die gemessene Reflexion. Dies könnte daran liegen, dass der Hotspot im Modell sehr spitz abgebildet wird (vgl. vorheriger Absatz).

## 5.4 Invertierung von Reflexionsmodellen

Die Invertierung von Reflexionsmodellen ist die zur Erzeugung von Reflexionsspektren aus gegebenen Parametern umgekehrte Aufgabenstellung: Aus einem gegebenen Reflexionsspektrum soll auf die Parameter geschlossen werden, die dieses Spektrum erzeugt haben (JACQUEMOUD 1993, KIMES et al. 2000, HEDLEY et al. 2009).

Die Vorwärtsmodellierung eines Reflexionsspektrums  $R$  in dem Modell  $m$  mit dem Eingangsvariablenvektor  $x$  kann als

$$R = m(x) + \varepsilon \quad (5-16)$$

geschrieben werden. Dabei stellt  $\varepsilon$  den Restfehler zwischen simuliertem um gemessenem Spektrum dar (JACQUEMOUD et al. 2009). Diese Gleichung ist eine Kurzform für das Gleichungssystem  $R_i = m_i(x_1, x_2, \dots, x_k) + \varepsilon_i$  für  $i = 1, 2 \dots n$ , wobei  $n$  die Anzahl der betrachteten Wellenlängen und  $k$  die Anzahl der variablen Modellparameter ist. Die Inversion  $x = m^{-1}(R) + \varepsilon$  basiert bei nichtlinearen Modellen auf der Minimierung einer Kostenfunktion  $\delta^2$ , die gleichzeitig die Abweichungen zwischen der simulierten und der beobachteten Reflexion und zwischen den geschätzten Variablen und vorher festgelegten realistischen Werten der Variablen  $x_j^{vor}$  vergleicht und folgendermaßen aussehen kann:

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{R_i - m_i(x_1, x_2, \dots, x_k)}{\sigma_{R_i}} \right)^2 + \sum_{j=1}^k \left( \frac{x_j - x_j^{vor}}{\sigma_{x_j}} \right)^2, \quad (5-17)$$

wobei  $\sigma_{R_i}$  und  $\sigma_{x_j}$  Streuungsmaße sind.  $\sigma_{R_i}$  entspricht der Unsicherheit der gemessenen und modellierten Reflexionswerte,  $\sigma_{x_j}$  der Unsicherheit der vorab festgelegten Parameter (COMBAL et al. 2002, JACQUEMOUD et al. 2009). Der Invertierungsansatz über eine Kostenfunktion vereinfacht das Problem der Lösung eines großen, nichtlinearen Gleichungssystems auf das Problem der Suche nach einem Extremum einer multidimensionalen Funktion (KUUSK & NILSON 2005). Zwei Hauptkategorien von Invertierungsansätzen lassen sich unterscheiden: Ansätze, die vor allem den ersten Teil der Kostenfunktion betrachten, also die Distanz zwischen beobachteter und modellierter Reflexion minimieren, und solche, die vor allem den zweiten Teil berücksichtigen und die biophysikalischen Variablen in den Vordergrund stellen. Zur ersten Klasse gehören iterative Optimierung, Markovketten-Monte-Carlo-Methoden und Look-up Tables. Die zweite Klasse beinhaltet u.a. künstliche neuronale Netze (JACQUEMOUD et al. 2009). Wenn die Unsicherheiten  $\sigma$  unbekannt sind, kann die Kostenfunktion auch ohne sie formuliert werden. Außerdem kann der zweite Term außer acht gelassen werden, wenn keine Werte für die zu schätzenden Parameter vorgegeben werden (KUUSK & NILSON 2005, KOETZ et al. 2005, JACQUEMOUD et al. 1995). Dann verringert sich der Rechenaufwand und die Kostenfunktion vereinfacht sich zu

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^n (R_i - m_i(x_1, x_2, \dots, x_k))^2. \quad (5-18)$$

Die Modellinversion ist ein sogenanntes schlechtgestelltes Problem: Da unterschiedliche Eingangsparameterkombinationen zu fast identischen Ergebnissen führen können, ist es oft

nicht möglich, von einem Reflexionsspektrum eindeutig auf die Eingangsgrößen zu schließen (COMBAL et al. 2002, ATZBERGER 2004, SCHLERF & ATZBERGER 2006). Dieses Problem wird umso gravierender, je mehr freie Parameter das Modell hat (KÖTZ et al. 2004). Können also einige Parameter mit Hilfe externer Zusatzinformationen festgesetzt werden, erhöht sich die Invertierbarkeit (ATZBERGER 2003). Für die oben angegebenen Kostenfunktionen heißt dies, dass  $k$  verkleinert wird.

Um Parameter festsetzen zu können, sind zusätzliche Informationsquellen notwendig. Dies kann Expertenwissen sein, Geländedaten oder Daten, die fernerkundlich erhoben worden sind. Hier bieten sich Laserscannerdaten besonders an, da sie Informationen liefern, die von passiven Fernerkundungssensoren nicht geliefert werden können (KOETZ et al. 2007). So kann also ein kombinierter Datensatz aus multi- oder hyperspektralen passiven Fernerkundungsdaten und Laserscanningdaten verwendet werden, um mit den Laserdaten strukturelle Forstparameter zu schätzen und mit diesen als Randbedingung die Spektren der passiven Daten mit einem Reflexionsmodell zu invertieren.

## 5.5 Invertierung von FRT

FRT hat eine integrierte Inversionsroutine, die auf einer Kostenfunktion beruht, die Gleichung (5-17) erweitert, hier abweichend von der Darstellung von KUUSK & NILSON (2005) mit den Variablenbezeichnungen von Gleichung (5-17) wiedergegeben:

$$\delta^2 = \sum_{i=1}^n \left( \frac{R_i - m_i}{\sigma_{R_i}} \right)^2 + \sum_{j=1}^k \left[ (x_j - x_{j,b})^4 w_j^2 + \left( \frac{x_j - x_j^{vor}}{\sigma_{x_j}} \right)^2 \right]. \quad (5-19)$$

$R_i$  und  $m_i$  sind die gemessenen und modellierten Reflexionswerte,  $\sigma_{R_i}$  die Unsicherheit der gemessenen Reflexion,  $n$  die Anzahl der Wellenlängen,  $k$  die Anzahl der zu optimierenden Parameter  $x_j$ .  $x_{j,b}$  ist die vorgegebene Grenze für einen Parameter. Das Gewicht  $w_j$  ist 0 im Bereich zwischen vorgegebenem Minimum und Maximum, außerhalb eine vom Benutzer zu setzende Konstante. Dieser Term der Kostenfunktion berücksichtigt also für die Modellparameter Spannweiten, innerhalb deren sie sich frei bewegen dürfen, während außerhalb der Spannen die Kosten stark ansteigen. Der letzte Term behandelt die Abweichung des Parameters von vorgegebenen Wert (*Expert guess*,  $x_j^{vor}$ ).  $\sigma_{x_j}$  ist die Toleranz für Abweichungen vom *Expert Guess*. Durch Variation des Toleranzparameters und des Gewichts kann gesteuert werden, wie stark sich die einzelnen optimierten Parameter an den Vorgaben für *Expert Guess* sowie Minimum und Maximum orientieren (KUUSK & NILSON 2005).

Die Inversionsroutine wird aufgerufen, indem in der Steuerdatei (siehe Anhang F.1) in Zeile 40 eine 4 oder 5 gesetzt wird. Der Code 4 steht dabei für die Inversion unter Verwendung der vollen Kostenfunktion, während bei Code 5 nur die absoluten Differenzen zwischen vorgegebenem Spektrum und Modellspektrum minimiert werden. Die Optimierungsmethode ist eine Powell-Minimierung nach PRESS et al. (1992). In der Steuerdatei wird außerdem angegeben, welche Parameter optimiert werden sollen. Für diese Parameter wird der im oberen Teil der Steuerdatei angegebene Wert in der ersten Spalte als erste Schätzung (*Expert Guess*) ver-

wendet, die nächsten Spalten als Minimum und Maximum in der Kostenfunktion und die letzte Spalte als Toleranz  $\sigma_{x_j}$  (siehe Anhang F.1, Zeile 08 als Beispiel). Das zu invertierende Spektrum wird ebenfalls in der Inputdatei angegeben, und zwar als dreispaltige Auflistung der Wellenlängen, der Reflexionswerte und der Unsicherheiten der Reflexionswerte.

Aufgerufen wird die Inversion genau wie die Vorwärtsmodellierung mit dem DOS-Befehl `frt inputfile outputfile`. Der Output ist eine Textdatei, die nochmals die Inputwerte auflistet und als Ergebnis die optimierten Werte für den gesuchten Parameter ausgibt.

### 5.5.1 Inversion ohne Zusatzinformationen

Die Invertierung von FRT wurde anhand von Daten aus der HyMap-Befliegung für die im Gelände beprobten Buchenbestände durchgeführt. Als Kostenfunktion wurde die vollständige in Gleichung (5-19) dargestellte Funktion verwendet. Nach den Ergebnissen der Sensitivitätsanalyse wurden sieben Parameter ausgewählt, die entweder einen großen Einfluss auf das resultierende Spektrum haben oder anhand der Geländemessungen überprüft werden können. Die sieben Parameter wurden als in dem in Tabelle 10 angegebenen Wertebereich variabel gesetzt. Die restlichen Eingangsgrößen wurden auf den in Anhang F.1 dargestellten Werten belassen. Außerdem wurde für die einzelnen Bestände der Blickwinkel des Hyperspektralsensors in die Steuerdatei eingesetzt.

Die Inversion mit sieben freien Parametern ist zeitaufwendig; für die zwölf gezeigten Spektren wird eine Rechenzeit von ca. 3 ½ Stunden benötigt.

**Tabelle 10:** Spannweite der Parameter für die Inversion von FRT

	Variable	Minimum	Maximum
SD	Stammzahl [m <sup>-2</sup> ]	0.01	0.6
H	Baumhöhe [m]	10	35
CL	Kronenlänge [m]	2	24
CR	Kronenradius [m]	0.9	6.5
m	Trockene Gesamtblattmasse [kg]	5	160
Cab	Chlorophyllgehalt [% der trockenen Blattmasse]	0.3	1.3
Cw	Wassergehalt [% der trockenen Blattmasse]	50	300

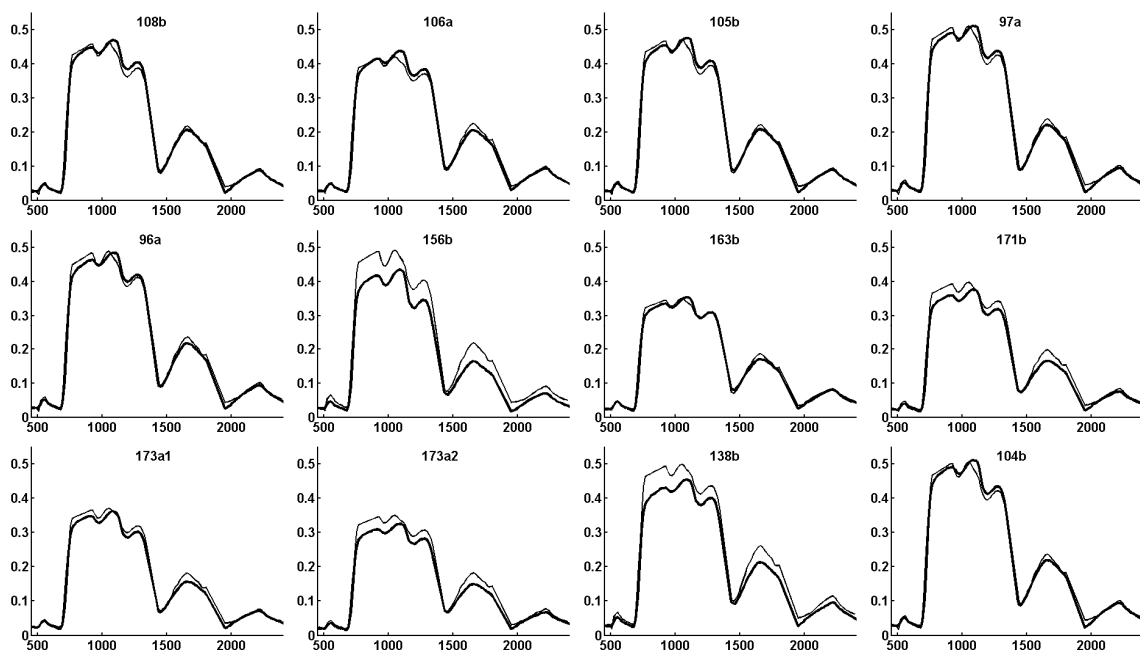
Um zu testen, wie gut mit den invertierten Parametern das Ausgangsspektrum wiedergegeben werden kann, wurden jeweils die gefundenen Parameter in eine neue Steuerdatei eingesetzt und mit dieser eine Vorwärtsmodellierung durchgeführt. Das erhaltene Spektrum wird mit dem Eingangsspektrum verglichen. Abbildung 69 zeigt für zwölf der im Gelände beprobten Buchenbestände Bild- und Modellspektren. Die meisten Spektren konnten recht genau reproduziert werden, bei einigen bestehen aber auch deutlich sichtbare Abweichungen. Abbildung 70 stellt die Abweichungen zwischen Bildspektren und reproduzierten Spektren dar. Im linken Diagramm sind die absoluten Abweichungen aufgetragen. Die größten Abweichungen bestehen, wie auch in Abbildung 69 zu erkennen ist, im Nahinfrarotplateau. Das rechte Diagramm zeigt die prozentualen Abweichungen. Hier treten die größten Werte in der Wasserabsorptionsbande bei 1950 nm auf. Da in diesem Wellenlängenbereich sehr geringe Refle-



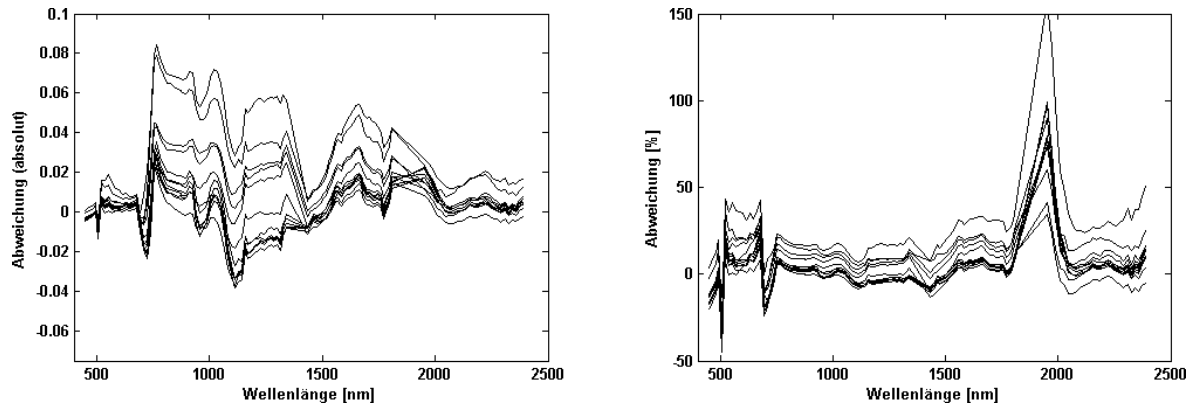
xionswerte zu finden sind, führen bereits relativ geringe absolute Abweichungen zu hohen prozentualen Abweichungen.

Die mittlere Abweichung zwischen Bildspektren und reproduzierten Spektren liegt bei 1.4 Prozentpunkten Reflexionsgrad. Es wurden unterschiedliche Parametrisierungen für die Inversion getestet, beispielsweise unterschiedliche Werte für den Toleranzparameter  $\sigma_{x_j}$ . Aber auch mit veränderten Parametrisierungen konnten die Abweichungen nicht deutlich reduziert werden. Die Abweichungen sind ähnlich groß wie in der Untersuchung von ZHANG et al. (2009), bei der Ergebnisse des Modells 4-Scale mit Daten des Hyperspektralsensors CASI verglichen wurden.

Die durch die Inversion erhaltenen Parameter sind in Tabelle 11 aufgeführt. Zwischen den Inversionsergebnissen, also den gefundenen Werten für Stammzahl etc., und den entsprechenden im Gelände gemessenen oder durch Laserscanning abgeleiteten Parametern konnten keine engen Zusammenhänge gefunden werden. Beispielsweise liegen fast alle invertierten Werte für die Kronenlänge unter 3 m, obwohl als Expert Guess 10 m vorgegeben waren. Bei Stammzahl, Baumhöhe und Kronenradius ist der Wertebereich der Inversionsergebnisse deutlich kleiner als der der Geländemessungen. Diese unbefriedigenden Ergebnisse sind eine Folge des schlechtgestellten Inversionsproblems und der vielen freien Parameter.



**Abbildung 69:** Bildspektren (fett) und aus invertierten Parametern erzeugte Modellspektren.



**Abbildung 70:** Links absolute Abweichungen zwischen Bildspektren und über Modellinversion rekonstruierten Spektren, rechts prozentuale Abweichungen.

**Tabelle 11:** Durch Inversion des Modells FRT bestimmte Parameter für 12 Buchenbestände

Name	Stammzahl	Höhe	Kr'länge	Kr'radius	Blattmasse	Cab	Cw
108b	0.162	32.779	2.783	4.444	46.509	1.152	239.180
106a	0.041	35.000	2.000	4.834	20.725	1.193	217.741
105b	0.175	34.983	2.553	4.506	47.255	1.118	244.559
97a	0.163	18.409	2.012	4.680	50.440	1.162	257.561
96a	0.169	30.413	2.069	4.444	49.409	1.094	234.132
156b	0.150	35.000	2.173	3.694	49.923	0.987	300.000
163b	0.044	30.210	2.538	3.942	14.296	1.112	225.107
171b	0.085	34.893	2.111	2.952	43.869	1.086	216.689
173a1	0.080	33.506	4.149	2.630	12.248	1.194	267.121
173a2	0.068	19.452	3.619	3.037	52.029	1.014	185.892
138b	0.050	26.957	2.000	4.007	36.614	1.098	238.112
104b	0.166	18.054	2.000	4.686	50.239	1.179	253.818

Da die Ergebnisse keine ausreichenden Übereinstimmungen zu den Geländedaten aufweisen, und mit dem Laserscanning von den Hyperspektraldaten unabhängige Fernerkundungsdaten des Untersuchungsgebiets zur Verfügung stehen, wurde eine Inversionsstrategie entwickelt, bei der die Strukturparameter genutzt werden konnten.

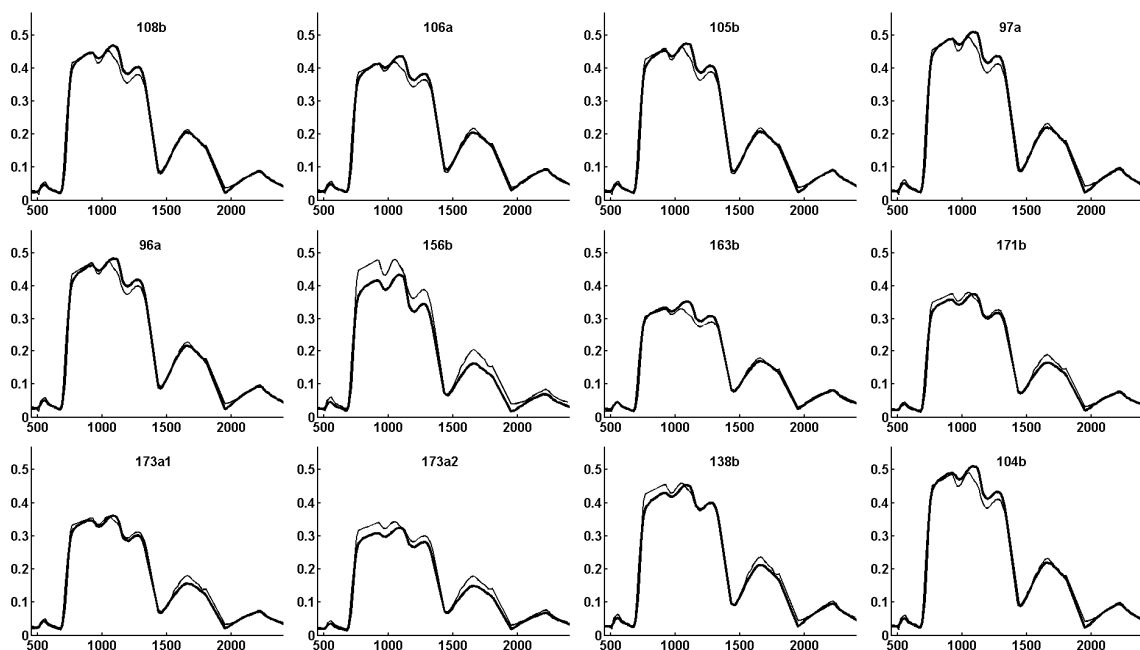
### 5.5.2 Inversion mit Informationen aus Lidar

Um den Rechenaufwand zu verringern und um dem Problem zu begegnen, dass unterschiedliche Parameterkombinationen zu fast identischen Spektren führen, wurde eine zweite Inversionsstrategie getestet. Bei dieser wurde für jeden zu invertierenden Bestand die per Laserscanning erfasste Information genutzt. Dadurch konnte die Anzahl der freien Parameter auf vier verringert werden.

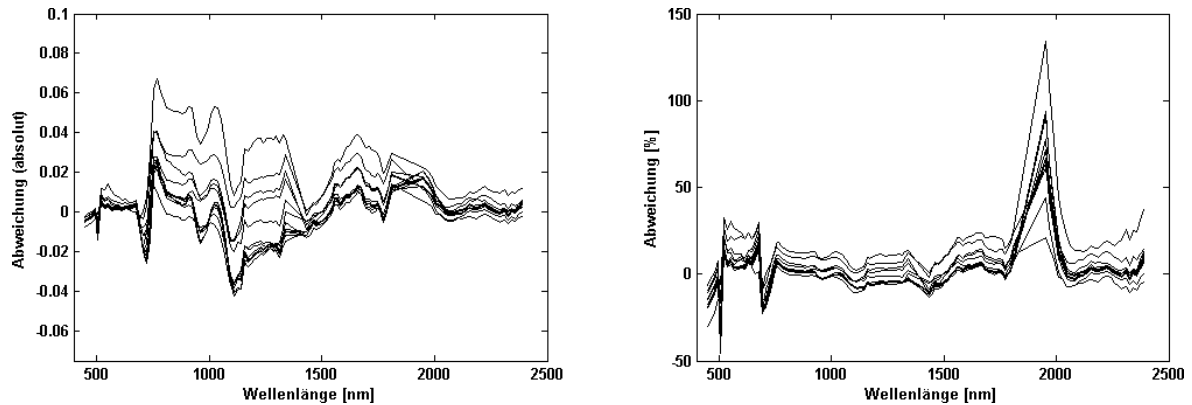
Aus den Laserscanningdaten wurden die Bestockungsdichte, die Baumhöhe und die Kronenlänge entnommen. Damit konnte die Inversion auf die freien Parameter Kronenradius, Gesamtblattmasse, Chlorophyllgehalt und Wassergehalt vereinfacht werden. Diese wurden wieder innerhalb der in Tabelle 10 aufgeführten Grenzen variiert. Um den in alten Beständen

deutlich dichteren Unterwuchs zu berücksichtigen, wurde der LAI der Krautschicht auf  $1/20$  der Baumhöhe gesetzt. Wie bei der Inversion mit sieben freien Parametern wurde die im Modell FRT integrierte Inversionsroutine mit der in Gleichung (5-19) dargestellten Kostenfunktion zur Berechnung der gesuchten Parameter genutzt. Die Rechenzeit für die zwölf Testbestände verringerte sich auf ca. 50 Minuten.

Abbildung 71 zeigt die Eingangsspektren und die rekonstruierten Modellspektren aus per Inversion und Lidar abgeleiteten Parametern. Die Abweichungen zwischen den beiden Spektrentypen sind geringer als bei der Inversion ohne Lidar-Unterstützung, sie liegen im Mittel bei 0.32 Prozentpunkten Reflexionsgrad. Abbildung 72 stellt die Abweichungen für die zwölf Testbestände dar. Wie bei der vorherigen Inversion liegen die größten absoluten Abweichungen im Nahinfrarotplateau. Die größte Abweichung tritt bei Bestand 156b auf. Dies ist der jüngste der betrachteten Buchenbestände mit sehr dichter Bepflanzung von 5600 Bäumen pro Hektar (vgl. Anhang A ). Während bei den anderen Beständen die angenommenen restlichen Modellparameter hinreichend gut passen, kann das Reflexionsspektrum dieses extremen Bestands nicht reproduziert werden. Die größten prozentualen Abweichungen treten wiederum in der Wasserabsorptionsbande bei 1950 nm auf.



**Abbildung 71:** Bild- (fett) und Modellspektren der Inversion von FRT unter Zuhilfenahme der Lidar-daten.



**Abbildung 72:** Links absolute Abweichungen zwischen Bildspektren und über Modellinversion unter Zuhilfenahme der Lidardaten rekonstruierten Spektren, rechts prozentuale Abweichungen.

Die resultierenden Parameter der Lidar-unterstützten Invertierung sind in Tabelle 12 dargestellt. Die Kronenradien korrelieren mit  $r = 0.63$  mit den im Gelände gemessenen Radien, die Blattmasse mit  $r = 0.71$  mit dem Bestandsalter laut FoGIS, wenn Bestand 138b als Ausreißer eliminiert wird. Die Bäume im Bestand 138b haben laut FoGIS ein Alter von 238 Jahren und laut Geländemessung mit 133 Bäumen pro Hektar die geringste Stammdichte aller betrachteten Bestände. Ebenso wie der extrem dichte Bestand 156b, bereitet der extrem lichte Bestand 138b dem Modell Probleme, wenn es mit einer für möglichst alle Bestände passend parametrisiert wird. Die aus Laserscanning abgeleitete Stammzahl für diesen Bestand ist deutlich zu hoch, und die infolgedessen vom Modell bestimmte Blattmasse pro Baum deutlich zu niedrig. Die Zuverlässigkeit der vom Modell ausgegebenen Chlorophyll- und Wassergehalte kann nicht überprüft werden, da hier Referenzdaten fehlen.

Während bei der Modellinversion mit sieben freien Parametern und ohne Zuhilfenahme der Lidar-Informationen keine signifikanten Zusammenhänge zwischen modellierten und gemessenen Parametern gefunden werden konnten, liegen bei der zweiten Variante deutliche Korrelationen vor. Daher kann davon ausgegangen werden, dass die Modellinversion durch die Einbeziehung der Lidar-Informationen verlässlicher ist als ohne.

**Tabelle 12:** Durch Lidar-unterstützte Inversion des Modells FRT bestimmte Parameter für 12 Buchenbestände

Name	Kr'radius	Blattmasse	Cab	Cw
108b	7.245	75.670	1.161	244.630
106a	5.833	5.177	1.300	252.419
105b	6.226	49.928	1.121	247.587
97a	5.879	54.425	1.156	256.582
96a	4.215	23.054	1.115	238.617
156b	2.519	17.160	0.975	298.458
163b	8.500	58.357	0.774	148.718
171b	2.141	7.658	1.123	217.950
173a1	1.803	3.667	1.133	258.541
173a2	2.538	20.261	1.011	180.783
138b	4.912	16.583	1.123	241.412
104b	5.940	58.700	1.171	252.597

Als Alternative zu dem komplexen Modell FRT sollen im folgenden Absatz Invertierungsansätze und -ergebnisse des einfacheren Bestandsreflexionsmodells FLIM/INFORM dargestellt werden.

## 5.6 Invertierung von FLIM/INFORM

Für das Modell FLIM/INFORM wurden zwei Invertierungsstrategien getestet: Invertierung mit Hilfe von Lookup-Tables und Invertierung durch numerische Minimierung. Die Herangehensweise und Ergebnisse werden im Folgenden dargestellt.

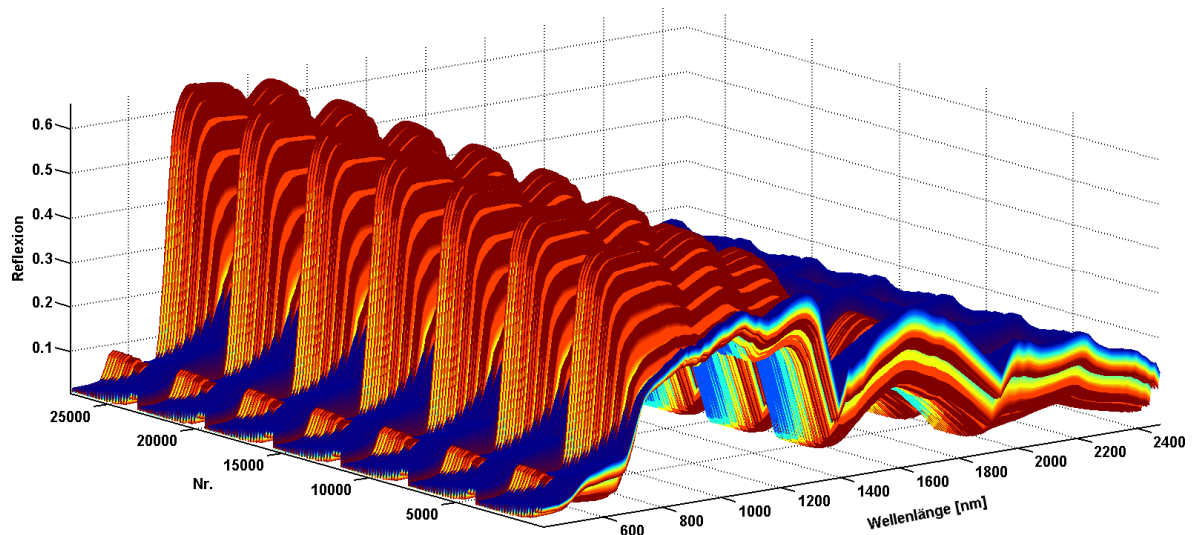
### 5.6.1 Invertierung von FLIM/INFORM über Lookup-Tables

Die Invertierung von FLIM/INFORM wird mit Hilfe von Lookup-Tables (LUT) durchgeführt. Das Prinzip der Invertierung via LUT beruht darauf, Vorwärtsmodellierungen mit möglichst allen in Frage kommenden Parameterkombinationen durchzuführen und die Ergebnisspektren mit den dazugehörigen Parametern als synthetischen Datensatz zu speichern (SCHLERF & ATZBERGER 2006). Das zu invertierende Spektrum wird dann mit den erzeugten Modellspektren verglichen. Im einfachsten Fall wird das Modellspektrum mit der kleinsten Abweichung zum Eingangsspektrum ausgewählt und seine Parameter als Ergebnis der Invertierung ausgegeben. Andere Ansätze wählen mehrere gut passende Spektren aus und bestimmen die Parameter aus diesen, beispielsweise durch Interpolation oder durch Bestimmung des Medians der Parameter (COMBAL et al. 2002, KIMES et al. 2002, KOETZ et al. 2005, 2006). Ein Vorteil bei der LUT-Inversion gegenüber vielen anderen Verfahren besteht darin, dass die Lösungssuche nicht in einem lokalen Minimum enden kann, da der gesamte Raum von Lösungen bereits a priori besteht (FANG et al. 2003). Trotzdem wird das absolute Minimum der möglichen Abweichungen zwischen Bildspektrum und Modellspektren nicht automatisch gefunden, sondern nur dann, wenn die optimalen Eingangsparameter bei der Erzeugung der LUT verwendet wurden.

Der LUT-Ansatz ist eine der einfachsten Möglichkeiten zur Invertierung von Reflexionsmodellen (COMBAL et al. 2002). Wenn die LUT einmal erstellt ist, geht die Invertierung sehr schnell, auch für viele Spektren. Das grundsätzliche Problem, dass die Inversion umso schwieriger wird, je mehr freie Parameter vorhanden sind, tritt bei der LUT-Inversion jedoch sehr deutlich hervor, indem jeder zusätzliche freie Parameter die LUT sehr stark anwachsen lässt und damit auch die Erzeugung der LUT sehr lange dauern kann (DARVISHZADEH et al. 2008). Soll beispielsweise eine LUT erstellt werden, in der 5 Parameter systematisch in jeweils 10 Stufen abgebildet werden, enthält diese bereits  $10^5$ , also 100 000, Spektren und gespeicherte Parametersätze (BACOUR et al. 2002). Wenn die Spektren wie HyMap-Spektren 128 Kanäle enthalten und, wie in Matlab üblich, als Double-Precision-Variable gespeichert werden, belegt die LUT ca. 14 MB Speicherplatz. Bei mehr Parametern oder mehr Abstufungen wird sie schnell zu groß. Abbildung 73 zeigt eine LUT mit 27 216 Spektren, die durch systematische Kombination der vorgegebenen Eingangsparameter mit INFORM erzeugt wurde. Alternativ zu systematischen Parameterwerten kann die LUT auch aus zufälligen Parameterkombinationen erstellt werden, wobei auch dabei darauf zu achten ist, ausreichend viele Einträge zu erzeugen. HEDLEY et al. (2009) schlagen adaptive LUTs vor, bei denen dicht besetzte Regionen des Parameterraums in kleineren Abständen abgebildet werden als dünn besetzte. Als weiteren Weg zur Erzeugung einer LUT haben KOETZ et al. (2007) nicht die Eingangsparameter direkt festgelegt, sondern mit einem Waldwachstumsmodell 100 000 unterschiedliche Bestände erzeugt, deren Reflexion modelliert und diese als LUT verwendet. Dadurch wurde die Modellierung unrealistischer Parameterkombinationen verhindert.

### **Erzeugung der LUT**

Für die Invertierung von FLIM/INFORM wurden zwei getrennte LUTs erstellt: Eine LUT dient der Invertierung von Laubwaldspektren und verwendet PROSPECT-4 für die Blattreflexion, die zweite LUT verwendet LIBERTY für die Nadelreflexion und dient der Inversion von Nadelwaldspektren. Die in den erzeugten LUTs verwendeten Parameter sind in Tabelle 13 aufgeführt. Durch systematische Kombination dieser Parameter wurden jeweils LUTs mit ca. 500 000 Einträgen erzeugt.



**Abbildung 73:** Spektren einer mit PROSPECT/FLIM/INFORM erzeugten LUT mit 27216 Einträgen

**Tabelle 13:** Spannweite der Eingangsparameter für die LUT-basierte Inversion von FLIM/INFORM

Variable	Minimum	Maximum
LAI <sub>s</sub> Einzelbaum-Leaf Area Index	3	9
SD Stem Density	400	2200
H Baumhöhe	10	30
CD Kronendurchmesser	2	7
Cab Chlorophyllgehalt (Prospect)	40	75
Cw Wassergehalt (Prospect)	0.01	0.04
Cm Gehalt an Trockenmasse (Prospect)	0.002	0.016
Cab Chlorophyllgehalt (Liberty)	200	400
Cw Wassergehalt (Liberty)	40	200
Cm Gehalt an Trockenmasse (Liberty)	20	80

### Inversion mit Hilfe der LUTs

Bei der Inversion wurden die von HyMap aufgenommenen Spektren aller im Gelände vermessenen Bestände verwendet. Diese wurden dann jeweils unter Verwendung einer Kostenfunktion mit den Spektren der passenden LUT für Laub- oder Nadelwald verglichen.

Bei Anwendung der einfachen Kostenfunktion  $\delta^2 = \sum(R_i - m_i)^2$  konnten zwar Modellspektren mit sehr geringen Abweichungen zu den Bildspektren gefunden werden, aber die Parameter des Inversionsergebnisses waren teilweise deutlich unterschiedlich zu den im Gelände gemessenen oder aus Lidar-Ergebnissen abgeleiteten Parametern. Analog zur Inversion von FRT mit sieben freien Parameter ist dies eine Folge des schlechtgestellten Inversionsproblems: Modellspektren aus falschen Parametern können besser zu Bildspektren passen als solche aus den richtigen Parametern. Als eine Lösung dieses Dilemmas könnten individuelle LUTs für jedes Spektrum berechnet werden, bei denen jeweils die aus dem Bild abgeleiteten Parameter fest eingesetzt und die freien Parameter variiert werden. Dies würde jedoch bei vielen zu invertierenden Spektren einen sehr großen Rechenaufwand bedeuten. Stattdessen

wurde eine Kostenfunktion gewählt, die wie Gleichung (5-17) sowohl Abweichungen zwischen modelliertem und gemessenem Spektrum als auch Abweichungen zwischen Modellparametern und gemessenen Parametern berücksichtigt:

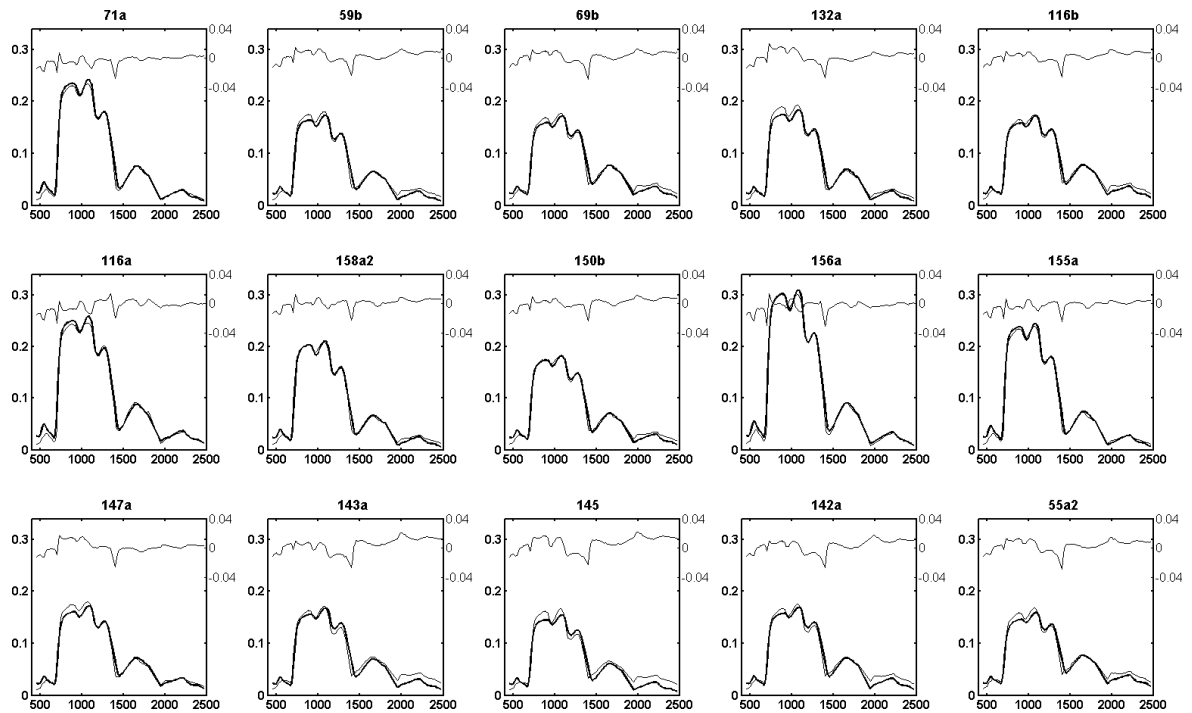
$$\delta^2 = \sum_{i=1}^n (R_i - m_i(x_1, x_2, \dots, x_k))^2 + w \cdot \sum_{j=1}^k (x_j - x_j^{vor})^2. \quad (5-20)$$

Da die Unsicherheiten der einzelnen Messungen nicht bekannt sind, gehen sie nicht in die Kostenfunktion ein. Das Gewicht  $w$  wurde so gewählt, dass der Einfluss beider Terme ungefähr gleich groß wird. Damit jeder Parameter  $x_j$  unabhängig von seinem Wertebereich gleich stark gewichtet wird, werden die Parameter normalisiert, indem sie durch das jeweilige Maximum dividiert werden.

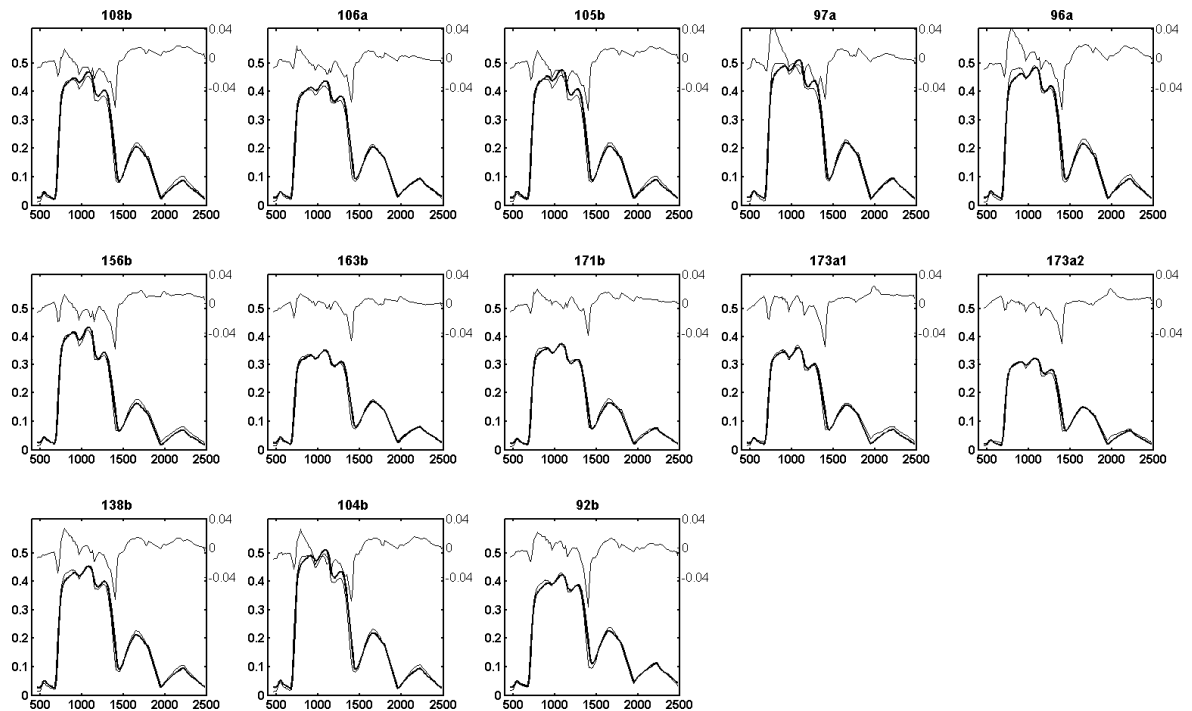
Abbildung 74 zeigt für die 15 im Gelände vermessenen Fichtenbestände die Ergebnisse der Inversion mit LIBERTY/SAILH/FLIM/INFORM. Für die Bestände wurden jeweils die aus den Laserscanning-Daten abgeleiteten Werte für Einzelbaum-LAI (als Bestands-LAI geteilt durch Bedeckungsgrad), Stammzahl pro Hektar, Baumhöhe und Kronendurchmesser als  $x_j^{vor}$  eingesetzt und das Modell über die LUT invertiert. Als feine Linie ist das am besten passende Modellspektrum, also das LUT-Spektrum mit dem geringsten Wert der Kostenfunktion  $\delta^2$  eingezeichnet. Die Residuen, also die Differenz zwischen Bildspektren und Modellspektren, sind im oberen Teil der Graphiken dargestellt. Im Mittel weichen die modellierten Reflexionsgrade von den gemessenen um 0.6 Prozentpunkte ab. In Abbildung 75 ist das entsprechende Ergebnis für die Buchenbestände und die Modellkombination PROSPECT-4/SAILH/FLIM/INFORM dargestellt. Hier liegt die mittlere Abweichung bei 1 Prozentpunkt.

Durch die Einbeziehung der Strukturparameter aus Lidardaten verringert sich die Variationsfreiheit des Modells, es können nur noch Spektren aus der LUT ausgewählt werden, die aus ähnlichen Parametern erzeugt wurden, wie sie im betrachteten Bestand tatsächlich herrschen. Die Abweichung zwischen den vom Modell ausgegebenen Strukturparametern und den durch Laserscanning bestimmten Parametern ist durch die Verwendung der Kostenfunktion also automatisch gering. Da es, wie in Abbildung 74 und 72 dargestellt, trotz der eingeschränkten LUT gelingt, die Bildspektrum mit geringer Abweichung zu treffen, sind auch die Schätzungen der nicht aus Lidar ableitbaren Daten, insbesondere von Chlorophyll- und Wassergehalt, wahrscheinlich verlässlich. Dies kann mangels Referenzmessungen allerdings nicht überprüft werden.





**Abbildung 74:** HyMap-Bildspektren (fett) und mit LIBERTY/INFORM modellierte Spektren sowie Residuen für die 15 im Gelände vermessenen Fichtenbestände.



**Abbildung 75:** HyMap-Bildspektren (fett) und mit PROSPECT/INFORM modellierte Spektren sowie Residuen für die 13 im Gelände vermessenen Buchenbestände.

### 5.6.2 Invertierung von FLIM/INFORM über numerische Minimierung

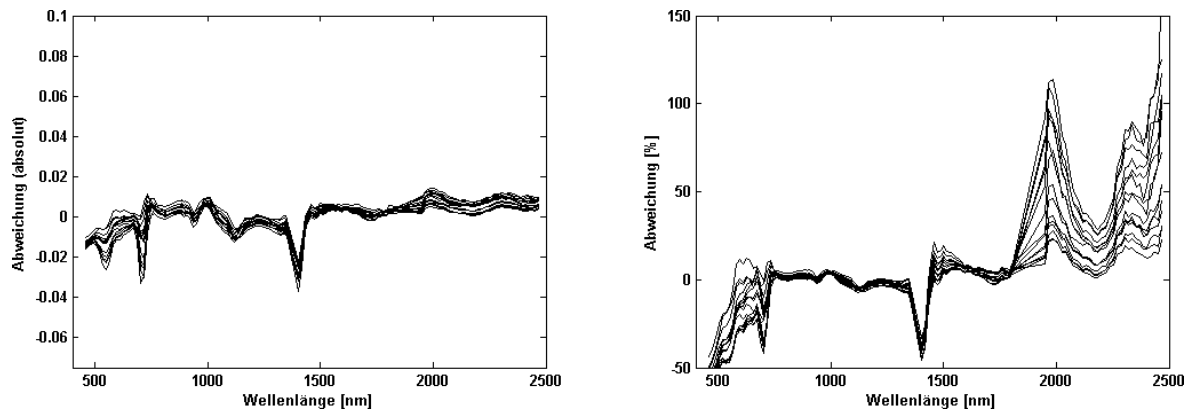
Als alternative Invertierungsstrategie wurde eine Invertierung über numerische Minimierung getestet. Dabei werden von einem Algorithmus die Inputparameter variiert, bis das Residuum zwischen modelliertem und Ursprungsspektrum minimiert ist. Da INFORM sehr schnell arbeitet, ist eine numerische Minimierung in akzeptabler Zeit möglich. Eine ähnliche Invertierungsstrategie hat ATZBERGER (2000a & b) für INFORM angewandt.

Zur Minimierung wurde die in MATLAB implementierte Funktion `fminsearch` verwendet, die einen Simplex-Algorithmus verwendet (MATHWORKS 2008). Die Simplex-Suche ist eine direkte Suchmethode, die ohne Ableitungen auskommt. Ausgehend von einem vorgegebenen Parametersatz werden bei der Optimierung von  $n$  Parametern  $n+1$  Parametersätze erzeugt, für die jeweils der Funktionswert, also die Abweichung zwischen vorgegebenem und berechnetem Spektrum, berechnet wird. Mit jeder Iteration wird der schlechteste Parametersatz durch einen neuen ersetzt. Die Optimierung endet, wenn ein Grenzwert für das Residuum unterschritten wird oder eine maximale Anzahl von Iterationen erreicht ist.

Wird die maximale Anzahl von Iterationen sehr hoch gesetzt (über 1000), kann es zu Überanpassungen kommen, so dass Parameter außerhalb realistischer Wertebereiche ausgegeben werden, beispielsweise über 30 000 Bäume pro Hektar oder ein negativer LAI des Unterwuchses. Bei 250 Iterationen und 7 freien Parametern ist die Abweichung zwischen Originalspektrum und modelliertem Spektrum bereits sehr gering, und die Ergebnisparameter liegen im richtigen Wertebereich. Außerdem braucht die Inversion mit 250 Iterationen ca. 20 Sekunden pro Spektrum im Gegensatz zu 160 Sekunden bei bis zu 2500 Iterationen.

Auch bei dieser Inversionsmethode bleibt das Problem bestehen, dass bei gleichzeitiger Inversion zu vieler Parameter die Verlässlichkeit der geschätzten Größen durch das schlechtgestellte Problem abnimmt. Diesem Problem kann begegnet werden, indem die Anzahl der zu schätzenden Parameter reduziert wird. Auch bei der numerischen Inversion können freie Parameter durch Ergebnisse aus der Analyse der Laserscannerdaten ersetzt werden. Dadurch werden Ambivalenzen vermieden, beispielsweise kann dann ein hoher Bedeckungsgrad nicht mehr alternativ durch hohe Bestockungsdichten oder durch hohe Kronendurchmesser erzeugt werden, sondern muss bei gegebener Bestockungsdichte über den Kronendurchmesser geregelt werden. Trotz der Schranken, die der Minimierung durch die Einbeziehung der Laserdaten gesetzt wurden, konnten die Bildspektren wieder gut reproduziert werden.

Abbildung 76 zeigt die Abweichungen zwischen Bildspektren und Spektren, die mit den Parametern aus der Inversion über numerische Minimierung modelliert wurden. Die Achseneinteilungen sind zur besseren Vergleichbarkeit an Abbildung 70 und 69 angepasst. Die absoluten Abweichungen sind für alle Testbestände gering und ähnlich, bei den prozentualen Abweichungen gibt es, vor allem im sichtbaren und im mittleren infraroten Wellenlängenbereich deutliche Unterschiede zwischen den Beständen und teilweise große Werte.



**Abbildung 76:** Abweichungen zwischen Bildspektren und mit Parametern aus der numerischen Inversion in INFORM modellierten Spektren. Links: absolute Abweichungen, Rechts: Prozentuale Abweichungen.

## 5.7 Fazit

Da die Reflexion von Forstbeständen von einer Vielzahl von Parametern abhängt, die teilweise schwierig zu messen sind, ist auch die Modellierung komplex. Die beiden verwendeten Bestandsreflexionsmodelle FRT und INFORM verfolgen unterschiedliche Philosophien bei der Herangehensweise an die Herausforderung, der Komplexität gerecht zu werden. FRT ist selber sehr komplex und verwendet viele Inputparameter, unter anderem, weil unterhalb der Kronenschicht noch zwei zusätzliche Vegetationsschichten modelliert werden. Wichtige Parameter des Modells, wie die gesamte Blattmasse, der Anteil der Rinde, der Baumverteilungsparameter oder der Triebbeschattungskoeffizient werden üblicherweise im Gelände nicht gemessen, und müssen geschätzt werden. Bei INFORM dagegen ist die Anzahl der Eingangsgrößen sehr viel geringer; die benötigten Werte lassen sich außerdem im Gelände einfacher erheben.

Aus diesen Gründen ist – zumindest theoretisch – die Inversion von INFORM einfacher. Aufgrund der hohen Geschwindigkeit ist INFORM außerdem für LUT-Ansätze und numerische Minimierung zur Inversion gleichermaßen geeignet.

Ziel der hier vorgestellten Invertierungsansätze war nicht, die Parameter der betrachteten Forstbestände möglichst genau herauszufinden, sondern Möglichkeiten zu testen, die strukturellen Informationen aus der Auswertung der Laserscanningdaten in die Invertierung von Bestandsreflexionsmodellen einfließen zu lassen. Es konnte gezeigt werden, dass diese Informationen bei unterschiedlichen Inversionsstrategien zweier unterschiedlicher Modelle berücksichtigt werden können und hilfreich sein können.

Bei FRT können die Strukturinformationen in die Parameterdatei geschrieben werden, entweder als *Expert Guess* für freie Parameter, oder als festgesetzte Parameter. Bei INFORM können sie beim Funktionsaufruf der numerischen Minimierung übergeben werden, oder genutzt werden, um eine LUT nach passenden Einträgen zu filtern.

# Kapitel 6    Diskussion

Die vorliegende Arbeit hatte sich zum Ziel gesetzt, den Beitrag, den luftgestütztes Laserscanning in der modernen Forstfernerkundung leisten kann, aufzuzeigen und zu bewerten. Einerseits sollten für das operative Forstmanagement relevante Größen abgeleitet werden, andererseits solche, die für ökologische Fragestellungen im Forst relevant sind. Außerdem sollte geklärt werden, ob und wie Laserscanning bei der Inversion von Bestandsreflexionsmodellen zur Ableitung biophysikalischer und biochemischer Werte aus Hyperspektraldaten hilfreich sein kann. Des Weiteren ist in einer Kosten-Nutzen-Abschätzung zu klären, ob der Nutzen, der von Laserscanning erbracht werden kann, auch von alternativen Techniken mit gleichem oder geringerem Aufwand erzielbar ist.

## 6.1 Laserscanning zur Forstfernerkundung

Wälder und Forsten bedecken große Anteile der Fläche Deutschlands. Der Wald als dynamisches System muss, insbesondere in Anbetracht des sich wandelnden Klimas, regelmäßig überwacht werden. Insbesondere die öffentliche Forstverwaltung hat mit Einsparungen zu kämpfen, infolge derer immer weniger Personal zur Überwachung der Wälder zur Verfügung steht. Außerdem ist die Nachfrage nach Holz groß, so dass außer in den Wäldern der öffentlichen Hand auch in Privatwäldern zur Verfügung stehende Holzressourcen mobilisiert werden sollen. Daher bietet es sich an, Wälder fernerkundlich zu beobachten.

Die Fernerkundung bietet Techniken, um flächenhaft Daten über den Zustand von Wäldern zu erfassen. Je nach Fragestellung stehen dabei unterschiedliche Techniken zur Verfügung. Während Luft- und Satellitenbilder die spektral aufgelöste Reflexion der einfallenden Sonnenstrahlung verwerten, messen Laserscanner die Laufzeit und Intensität eines selbst ausgesandten Laserstrahls. Dadurch wird nicht nur die Oberfläche von Vegetationsbeständen abgebildet, sondern auch die innere dreidimensionale Struktur. Diese zusätzliche Informationsebene macht Laserscanning zu einem potentiell wertvollen Instrument, um Strukturgrößen im Wald zu erfassen.

Kenntnis der strukturellen Forstparameter ist sowohl für das operative Forstmanagement als auch für die Betrachtung des Waldes als Ökosystem, als Kohlenstoffspeicher, als Wasserrückhaltekörper und als Erholungsraum wichtig. Ökologen brauchen Informationen über die Positionen und Größen von Bäumen und über die Struktur der Kronenschicht und des Unterwuchses, beispielsweise für die Analyse von Konkurrenzbeziehungen im Wald. Das Forstmanagement ist vor allem am mobilisierbaren Holzvorrat und an der Position einzelner dominanter Bäume interessiert.

In der vorliegenden Arbeit wurde flugzeuggestütztes Laserscanning auf seine Fähigkeiten hin untersucht, Daten zu erfassen, die in der Erforschung ökosystemarer Prozesse im Wald und in der Forstwirtschaft von Interesse sind.

Die Vorverarbeitung von Laserscanner-Daten unterscheidet sich deutlich von der Vorverarbeitung passiver Fernerkundungsdaten. Eine geometrische Korrektur ist üblicherweise nicht notwendig, da jeder einzelne Punkt über differentiell GPS, inertielle Navigation und Laufzeitmessung bereits bei der Aufnahme exakt eingemessen wird. Der Blockausgleich zwischen den einzelnen Flugstreifen wurde zumindest bei den vorliegenden Daten durch die Auftragnehmer durchgeführt. Auch eine radiometrische Bearbeitung der Daten ist meistens unnötig. Die Höheninformationen sind unabhängig von der Radiometrie, und eine Korrektur der Intensitätsdaten wurde ebenfalls beim Auftragnehmer ausgeführt. Nur bei der Verwendung der Intensitätsinformationen aus den Fullwave-Daten musste eine eigene Korrektur für die Abschwächung des Signals bei zunehmender Distanz zwischen Ziel und Sensor angewendet werden. Der kritischste und aufwendigste Schritt bei der Vorverarbeitung ist die Filterung der Bodenpunkte. Dieser wurde ebenfalls im Voraus vorgenommen. Weil beim Laserscanning nicht Pixel, sondern halbzufällig verteilte Einzelpunkte aufgenommen werden, sind weitere Arbeitsschritte notwendig, die bei klassischen Bilddaten nicht anfallen: das Kacheln und das Interpolieren in ein Raster. Im Ganzen ist die Vorverarbeitung der Punktdaten nicht aufwendiger als bei Satellitenbildern, wenn auch zunächst die notwendigen Verfahren entwickelt werden mussten, da zu Beginn der Arbeit noch keine fertigen Programme dafür zur Verfügung standen. Die Bearbeitung der Wellenformdaten ist noch als offenes Forschungsfeld zu bezeichnen, bei dem einige Fortschritte erzielt wurden und in Zukunft noch weitere Fortschritte erwartet werden können.

Die meisten Untersuchungen, sowohl in der vorliegenden Arbeit als auch in der wissenschaftlichen Literatur, verwenden die dreidimensionale Position von Laserpunkten als primäre Informationsquelle. Zusätzliche Auswertemöglichkeiten bieten die aufgezeichneten Intensitäten und Wellenform-Lidar. Aus der Auswertung der Wellenformen können vielfältige Einblicke in den Bestand und in die Wechselwirkungen zwischen Laserstrahl und den getroffenen Objekten gewonnen werden. In der Auswertung dieser Wechselwirkungen bestehen noch große Forschungsperspektiven. Insbesondere zu Wellenform-Lidar mit kleinem Footprint und hoher geometrischer Auflösung existieren bisher erst wenige Arbeiten. Die Wellenformdaten wurden in der vorliegenden Arbeit zur Berechnung dreidimensionaler Bilder, zur Darstellung von horizontalen und vertikalen Schnitten durch den Wald und zur Extraktion zusätzlicher Punkte verwendet. Diese Bilder und die zusätzlichen Punkte zwischen erstem und letztem Puls ergeben sich ein detailliertes Bild der Baumkronen. Die Intensität der zurückgeworfenen Laserstrahlen enthält einen weiteren Informationsschatz. Intensitätsbilder können ähnlich wie Luftbilder genutzt werden, und neben der visuellen Interpretation zumindest zu einer rudimentären Klassifikation zwischen Laub- und Nadelwald dienen.

Wegen der dreidimensionalen Verortung der reflektierten Laserpunkte können insbesondere strukturelle Größen, die der klassischen passiven Fernerkundung nicht oder nur eingeschränkt zugänglich sind, aus Lidar-Daten mit teilweise hoher Genauigkeit abgeleitet werden. Die Baumhöhe ist der erste und wichtigste Parameter, der aus Forst-Laserscanning bestimmt werden kann. Baumhöhen können routinemäßig aus Lidar-Daten abgeleitet werden und werden operationell im Forstmanagement eingesetzt (WULDER et al. 2007, NÆSSET 2009a).

Die Genauigkeit der Höhenmessungen steht der Genauigkeit der meisten Geländemessungen in nichts nach, wenn auch insbesondere bei Nadelbäumen mit einer geringen systematischen Unterschätzung gerechnet werden muss. In der vorliegenden Arbeit konnte insbesondere durch die Verwendung eines Zweizonenfilters eine detaillierte und flächendeckende Karte der Baumhöhen erstellt werden, in der die Oberhöhe der Bestände geglättet abgebildet ist, ohne Bestandsgrenzen und Wege unscharf darzustellen.

Einerseits besteht ein recht enger Zusammenhang zwischen der Höhe und vielen anderen Strukturgrößen, so dass die fernerkundliche Messung der Höhe alleine schon für vielfältige Fragestellungen wertvoll ist. Andererseits können außer der Höhe auch weitere Strukturgrößen aus den Lidar-Daten abgeleitet werden, beispielsweise die Kronenlänge, die Bestockungsdichte (zumindest oberhalb der Etablierungsphase) und der Blattflächenindex.

Kronenuntergrenze und Kronenlänge können im Gegensatz zu den Baumhöhen nicht direkt aus dem normalisierten Kronenmodell abgelesen werden. Liegen nur die ersten und letzten Echos der Laserpulse vor, kann die Kronenuntergrenze nur indirekt über eine Korrelation zur Baumhöhe bestimmt werden. Stehen aber auch ausreichend Zwischenpunkte oder die kompletten Wellenformen zur Verfügung, kann die Untergrenze unter bestimmten Voraussetzungen direkt gemessen werden. Eine Voraussetzung ist, dass die Kronen nicht so dicht sind, dass die gesamten Laserstrahlen schon im oberen Kronenbereich reflektiert werden. Wenn die Kronen durchlässig genug sind, wird auch ein Teil des Strahls vom Boden reflektiert. Dann kann die Untergrenze häufig an der Abnahme der zurückgestreuten Energie identifiziert werden, die mit dem Fehlen reflektierender Objekte im Raum zwischen Krone und Boden einhergeht. Die zweite Voraussetzung ist damit das Vorhandensein von leerem Raum unter der Krone. Bei forstlich genutzten Beständen einheitlichen Alters ist dies oft gegeben, am Waldrand und in gemischten und natürlichen Beständen nicht. Da in der vorliegenden Arbeit die Voraussetzungen für eine Messung der Höhe der Kronenuntergrenzen durch das Vorhandensein von Wellenformdaten und größtenteils einheitliche Testbestände günstig waren, konnten hohe Übereinstimmungen mit den Geländemessungen erreicht werden.

Die Zählung der Bäume ist deutlich schwieriger als die Ableitung der Höhen. Insbesondere junge Bestände in der Etablierungsphase, aber auch reife Laubbaumbestände lassen keine eindeutige Identifikation der einzelnen Kronen zu. Auch junge Bäume unter dem Schirm älterer Bäume können nur sehr schwer identifiziert werden. Trotzdem wurden hochsignifikante Zusammenhänge zwischen der aus Lidar abgeleiteten Stammzahl und der Baumzählung im Gelände gefunden. Durch die Anwendung eines adaptiven Moving-Window-Ansatzes konnte die unterschiedliche Ausdehnung von Kronen unterschiedlichen Alters berücksichtigt werden.

Blattflächenindex und Überschirmungsgrad können aus dem Anteil der Laserstrahlen, die bis zum Boden durchdringen, berechnet werden. Je lichter ein Bestand ist, umso mehr Energie des Laserstrahls erreicht den Boden und daraufhin wieder den Sensor. Ein häufig diskutiertes Problem bei der fernerkundlichen Schätzung des Blattflächenindex ist die Abhängigkeit der sichtbaren Blattfläche von den Blatthaltungswinkeln (z.B. ATZBERGER 2003). Sind die Blätter

senkrecht zum Beobachtungswinkel ausgerichtet, ist die sichtbare Blattfläche deutlich größer als bei anderen Blatthaltungswinkeln. Folglich erreicht auch weniger Energie den Boden. Mit dem Problem, dass der scheinbare Blattflächenindex vom Winkel abhängt, haben prinzipiell sowohl Messungen des Blattflächenindex aus der Luft mit aktiven und passiven Sensoren als auch Messungen vom Boden aus, beispielsweise mit dem LiCor Plant Canopy Analyzer oder mit hemisphärischer Photographie zu kämpfen. Einzig destruktive Messungen oder Laubfallsammler sind dem Blatthaltungswinkel gegenüber neutral. Trotz dieser Schwierigkeiten konnten Blattflächenindex und Bedeckungsgrad mit hoher Übereinstimmung zu den Geländemessungen aus den Laserscanningdaten abgeleitet werden. Als effektiver als eine reine Zählung der Punkte im Bestand und am Boden haben sich dabei Methoden herausgestellt, die die jeweilige Intensität berücksichtigen, und die außer den ersten und letzten Punkten auch noch Zwischenpunkte einbeziehen.

Holzvorrat und Biomasse sind Größen, die dem Laserscanner nur indirekt zugänglich sind, anderen Fernerkundungssensoren allerdings auch. Ein großer Teil der Biomasse und natürlich auch des Holzvorrats sind im Stamm gespeichert. Die Stämme sind aber bei den verwendeten Punktdichten nicht im Laserscannerdatensatz zu erkennen. Über Beziehungen zur Baumhöhe und zum Bedeckungsgrad sind trotzdem von einigen Autoren gute Schätzungen des Holzvorrats erstellt worden. Auch bei der Bestimmung der oberirdischen Biomasse für die Abschätzung der gespeicherten Kohlenstoff- oder Nährstoffmenge kann Laserscanning die passive Fernerkundung ergänzen oder sogar ersetzen. Während Biomasseschätzungen passiver Fernerkundungsdaten und von Radar bei hohen Werten aufsättigen, wird Lidar als sensitiv auch für sehr große Biomassen beschrieben.

Die Unterscheidung von Baumarten ist eine Domäne der passiven Fernerkundungssensoren. Soll allerdings eine Bestimmung von Altersklassen erfolgen, bieten Laserscannerdaten durch die direkte Messung der Baumhöhen mehr Potential. Da es bei Lidar-Daten problemlos möglich ist, nur Echos aus dem Kronenraum zu berücksichtigen und es außerdem keine Schatten gibt, sind auch mit den Intensitäten von Lidar-Daten alleine Klassifikationen zwischen Laub- und Nadelbeständen möglich, die dafür, dass nur ein einzelner Spektralkanal zur Verfügung steht, bereits sehr gut sind. Die Fusion von passiven und aktiven Daten ermöglicht deutlich bessere Klassifikationen in Baumarten und Altersklassen, als einer der Datentypen alleine.

Bei allen Genauigkeitsabschätzungen der beschriebenen Ergebnisse muss berücksichtigt werden, dass auch die Referenzdaten Unsicherheiten enthalten. Bei der Messung der Baumhöhe im Gelände kann es beispielsweise schwierig sein, die Baumspitze anzupeilen oder die genaue Kronenuntergrenze zu bestimmen. Bei der Bestimmung des Bedeckungsgrades aus hemisphärischen Fotos spielen die Festsetzung des Grenzwerts zwischen Vegetationselementen und Himmel eine große Rolle, ebenso die Ausmaskierung von Stämmen und Ästen und die Gewichtung der zentralen und äußeren Pixel. Unterschiedliche Beleuchtungsverhältnisse während der Aufnahme führen zu unterschiedlichen Anteilen überstrahlter Blätter. Weitere Fehler bei hemisphärischen Fotos können durch Bildkompression zustande kommen. Außerdem kann die Qualität von Referenzdaten durch Fehler bei der Verortung der Testbestände beeinträchtigt werden, ebenso wie Fehler beim Aufschreiben der Daten oder bei der Übertra-

gung auf einen Computer. Des Weiteren gibt die Messung von Stichproben nie eine perfekte Aussage über die Grundgesamtheit. Aus all diesen Gründen kann es möglich sein, dass die aus Laserscanning abgeleiteten Strukturparameter die Wirklichkeit besser oder schlechter repräsentieren, als die angegebenen Genauigkeitsmaße vermuten lassen. Dieses Problem gibt es bei allen Vergleichen von fernerkundlich erhobenen Daten mit Referenzdaten. Es kann nicht vollständig gelöst werden, aber durch größtmögliche Sorgfalt bei der Erhebung der Referenzdaten gelindert werden.

## 6.2 Reflexionsmodellierung

Mit Hilfe von Bestands-Reflexionsmodellen kann der Zusammenhang zwischen der Bestandsstruktur und dem Reflexionsverhalten erforscht werden. Da dieser Zusammenhang nicht eindeutig umkehrbar ist, sind für die Inversion von Reflexionsmodellen zusätzliche Informationen oder Annahmen notwendig. Laserscanning bietet sich an, Größen zu liefern, die aus dem Reflexionsspektrum schwer oder gar nicht abgeleitet werden können, und so das schlechtgestellte Inversionsproblem zu vereinfachen.

Diese Erwartung konnte mit den vorliegenden Daten nur zum Teil erfüllt werden. Auch durch Festsetzung der strukturellen Modellparameter konnten die restlichen Größen nicht zuverlässig geschätzt werden. Der Ansatz des Modells FRT, für jeden freien Parameter einen Expertenvorschlag, eine Spannweite und einen Toleranzparameter angeben zu können, führt zu einer großen Flexibilität bei der Inversion, aber auch zu einer Fülle an zusätzlichen „Stellschrauben“, die zur Findung der besten Lösung justiert werden müssen. Die Fülle der Eingangsparameter macht das Modell unübersichtlich, was auch die Inversion erschwert.

Bei dem einfacher aufgebauten Modell INFORM ist die Auswirkung einzelner Parameteränderungen leichter nachzuvollziehen als bei FRT. Durch seine schnelle Rechenzeit steht es außerdem für mehr Invertierungsmethoden offen. Die Invertierung mit einer LUT könnte beispielsweise auch auf Bilddaten angewendet werden, während rechenintensivere Verfahren dafür zu langsam sind. Während beispielsweise ATZBERGER (2003) mit numerischer Minimierung und SCHLERF & ATZBERGER (2006) mit künstlichen neuronalen Netzen durch Inversion von INFORM Bestandsparameter mit hoher Genauigkeit aus Bildspektren ableiten konnten, waren die in der vorliegenden Arbeit gefundenen Übereinstimmungen zu Geländemessungen gering.

Trotzdem konnte gezeigt werden, dass die Einbindung von Strukturparametern in die Inversion möglich ist, und zwar bei sehr unterschiedlichen Inversionsverfahren und bei zwei unterschiedlichen Modellen. Dadurch wurde die schwierige Invertierbarkeit von Bestandsreflexionsmodellen zwar nicht gelöst, aber ein möglicher Weg gezeigt, wie dem schlechtgestellten Problem der Inversion in zukünftigen Studien begegnet werden kann.



### 6.3 Kosten-Nutzen-Analyse

Luftgestützte Lidar-Daten sind zweifellos der beste Weg, um flächendeckend mit hoher räumlicher Auflösung Strukturinformationen im Forst zu erheben, insbesondere die Baumhöhe. Da sich viele weitere Informationen aus der Baumhöhe ableiten lassen, reicht diese für viele Anwendungen als Strukturgröße aus. Daher kann es sinnvoll sein, Alternativen zum Laserscanning für die Bestandshöhenabschätzung in Betracht zu ziehen. Inzwischen stehen Fernerkundungssensoren zur Verfügung, die über mehrere Größenordnungen bezüglich räumlicher Auflösung, räumlicher Abdeckung, Genauigkeit und Preis dreidimensionale Informationen erheben können (MERCER 2004).

Luftgestützte Lidar-Daten bieten eine hohe Genauigkeit und räumliche Auflösung, sind aber teuer in der Erhebung, und werden daher, außer in einzelnen Studien, nur in großen zeitlichen Intervallen erhoben (HOPKINSON et al. 2008). Das Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz führt zur Zeit eine flächendeckende Laserbefliegung des Landes Rheinland-Pfalz durch, ist dabei aber vor allem am DGM interessiert, nicht an den Baumhöhen. Das DOM wird zwar auch erfasst, allerdings nur als Momentaufnahme. Da das DGM fast keinen zeitlichen Veränderungen unterworfen ist, ist nicht damit zu rechnen, dass die Befliegung in absehbarer Zeit wiederholt wird. Weltraumgestütztes Laserscanning ist aufgrund der groben räumlichen Auflösung bisher keine brauchbare Alternative zu luftgestütztem Lidar, zumindest nicht für die kleinteiligen mitteleuropäischen Wälder. Eine Alternative könnte IFSAR darstellen. Insbesondere wenn ein detailliertes Höhenmodell des Bodens, z.B. durch eine Lidar-Befliegung, vorliegt, können mit flugzeug- oder satellitengestütztem X-Band-IFSAR Modelle der Bestandsoberfläche gewonnen werden, deren Genauigkeit fast an die von Lidar-Oberflächenmodellen heranreicht. Die Befliegungskosten sind deutlich niedriger (ca. 10–50 \$/km<sup>2</sup> für IFSAR gegenüber ca. 250 \$ für Lidar laut ANDERSEN et al. 2006), so dass eine Wiederholung der Messungen mit hoher zeitlicher Frequenz (z.B. jährlich) möglich ist und damit auch Zeitreihen der Waldentwicklung hergestellt werden können. Dabei muss allerdings beachtet werden, dass Radar keine große Verbreitung hat. Es gibt zwar inzwischen mit TerraSAR-X und ALOS/PALSAR Satellitensensoren im X- und L-Band, aber hochauflösende Flugzeugsensoren sind noch als experimentell einzustufen. Die gegenüber Laserscanning aufwendigere Datenvorverarbeitung und -auswertung macht einen Teil des Preisvorteils zunichte.

In den Jahren seit der Einführung von luftgestütztem Laserscanning gibt es einen Trend zu effizienterer Datenerhebung und damit zu günstigeren Daten (HYYPÄ et al. 2008). Vor allem aufgrund der erhöhten Pulsraten moderner Scannersysteme können bei gegebener Bodendichte Flächen aus größerer Höhe und mit höherer Fluggeschwindigkeit abgetastet werden. Dadurch werden die Streifen breiter und Flächen können schneller erfasst werden (MALLETT & BRETAR 2009). Die von ANDERSEN et al. (2006) genannten 250 \$ pro km<sup>2</sup> erscheinen trotzdem auch heute noch zu optimistisch, zumindest für kleine zu befliegende Gebiete. Die tatsächlichen Kosten für die Erhebung und Verarbeitung von Laserscanningdaten anzugeben, ist schwierig. Eine vom Fach Fernerkundung im Sommer 2009 durchgeführte Ausschreibung für eine Befliegung von 25 km<sup>2</sup> mit einem Wellenform-Lidar und mindestens 4 Punkten pro

Quadratmeter zeigt erheblichen Preisunterschiede zwischen den Anbietern, wobei alle Preise über dem von ANDERSEN genannten lagen.

ST-ONGE et al. (2006) schlagen als weitere Möglichkeit zur Überwachung der Bestandshöhen vor, Baumhöhen aus hochauflösenden Stereo-Satellitenbildpaaren abzuleiten, um per Laserscanning gewonnene Informationen kostengünstig zeitlich fortzuschreiben. Je nach benötigter räumlicher Auflösung stehen unterschiedliche Satellitensysteme zur Ableitung dreidimensionaler Informationen zur Verfügung, von Satelliten wie Ikonos mit einer räumlichen Auflösung im Submeterbereich über SPOT und ASTER bis hin zu MISR, dessen räumlich Auflösung von 275 m nur für großräumige Kartierungen geeignet ist (CHOPPING et al. 2009).

Trotz dieser Alternativen sind die Stärken von Laserscanning, wie direkte Messung dreidimensionaler Koordinaten, hohe räumliche Auflösung und gleichzeitige Erfassung von Oberfläche, Kronenraum und Boden, allgemein anerkannt und haben zu einer starken Verbreitung der Technik in den letzten Jahren geführt. Die hohen Kosten gehen also mit hohem Nutzen einher.

## 6.4 Ausblick

Laserscanning zur Erfassung von Forstparametern werden mit großer Sicherheit auch in Zukunft eine wichtige Rolle spielen. Die weitere Entwicklung von Laserscanning wird voraussichtlich auf noch höhere Datenmengen hinsteuern. Einerseits können durch die hohen Pulsraten moderner Laserscanner, die teilweise bereits vor Empfang eines Echos den nächsten Puls lossenden, größere Flächen als bisher abgetastet werden, andererseits werden Detailbetrachtungen auf Einzelbaumniveau möglich. Punktdichten von 25 (REITBERGER et al. 2008) oder sogar 70 Punkten pro Quadratmeter (RAHMAN & GORTE 2008) könnten in den nächsten Jahren weitere Verbreitung finden. Dadurch würden Einzelbaumerkennungstechniken und die Erkennung von nachwachsenden Bäumen unter Schirm immer wichtiger.

Ein weiteres Forschungsthema kann die Nutzung der Oberflächenrauigkeit und die Verteilung von Zwischenpunkten im Kronenraum zur Baumartenidentifikation sein. Außerdem verspricht eine Analyse der Kronenformen einzelner Bäume, idealerweise im Abgleich mit terrestrischem Laserscanning, Erkenntnisse über ökologische Zusammenhänge, beispielsweise das Zusammenspiel und die Verdrängung benachbarter Bäume.

Die Fusion von Laserscannerdaten, insbesondere Wellenformdaten, mit hyperspektralen Bildern bietet ein großes Potential für weitere Untersuchungen. Auch in Zukunft werden nur selten zeitlich nahe beieinanderliegende Datensätze dieser unterschiedlichen Quellen vorliegen, aber es ist kaum eine Datenausstattung mit höherem Potential zur Charakterisierung von Forstbeständen denkbar. Im Sommer und Herbst 2009 wurden für ein Untersuchungsgebiet bei Merzalben im Pfälzer Wald HyMap-Daten, Wellenform-Laserscannerdaten und Geländedaten erhoben. Mit diesen sollen die in der vorliegenden Arbeit gewonnenen Erkenntnisse überprüft und erweitert werden.

# Literatur

- J.B. ABSHIRE, X. SUN, H. RIRIS, J. M. SIROTA, J. F. MCGARRY, S. PALM, D. YI & P. LIIVA (2005):** Geoscience Laser Altimeter System (GLAS) on the ICESat Mission: On-orbit measurement performance. *Geophysical Research Letters*, 32, L21S02, doi: 10.1029/2005GL024028.
- E. AHOKAS, X. YU, H. KAARTINEN, J. HYYPPÄ, S. KAASALAINEN, L. MATIKAINEN, E. HONKAVAARA, H. HYYPPÄ, P. RÖNNHOLM & A. SOININEN (2005):** Quality of Laser Scanning. In: *Proc. EARSeL Workshop 3D Remote Sensing*, Porto 7–9 June 2005, <http://www.ipi.uni-hannover.de/html/aktivitaeten/EARSeL-workshop2005.htm>.
- D. AKCA & A. GRUEN (2007):** Generalized Least Squares Multiple 3D Surface Matching. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, September 12-14, 2007, Finland, 1–7.
- H.E. ANDERSEN, S.E. REUTEBUCH & R.J. MCGAUGHEY (2005):** Accuracy of an IFSAR-derived digital terrain model under a conifer forest canopy. *Canadian Journal of Remote Sensing* 31 (4): 283-288.
- H.E. ANDERSEN, R.J. MCGAUGHEY & S.E. REUTEBUCH (2006):** Assessing the influence of flight parameters and interferometric processing on the accuracy of X-band IFSAR-derived forest canopy height models. *Proc. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, 14–15 Feb. 2006, Vienna, Austria: 110–116.
- E.S. ANDERSON, J.A. THOMPSON & R.E. AUSTIN (2005):** LIDAR density and linear interpolator effects on elevation estimates. *International Journal of Remote Sensing* 26: 3889–3900.
- J. ANDERSON, M.E. MARTIN, M.-L. SMITH, R.O. DUBAYAH, M.A. HOFTON, P. HYDE, B.E. PETERSON, J.B. BLAIR & R.G. KNOW (2006):** The use of waveform lidar to measure northern temperate mixed conifer and deciduous forest structure in New Hampshire. *Remote Sensing of Environment* 105: 248–261.
- J.E. ANDERSON, L.C. PLOURDE, M.E. MARTIN, B.H. BRASWELL, M.-L. SMITH, R.O. DUBAYAH, M.A. HOFTON & J.B. BLAIR (2008):** Integrating waveform Lidar with hyperspectral imagery for inventory of a northern temperate forest. *Remote Sensing of Environment* 112: 1856–1870.
- A.S. ANTONARAKIS, K.S. RICHARDS & J. BRASINGTON (2008):** Object-based land cover classification using airborne LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 112: 2988–2998.
- Arbeitskreis Standortkartierung (1985):** Forstliche Wuchsgebiete und Wuchsbezirke in der Bundesrepublik Deutschland. Münster.
- H. ARP, J.C. GRIESBACH & J.P. BURNS (1982):** Mapping in Tropical Forests: A new Approach using the Laser APR. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 48 (1): 91–100.
- G.P. ASNER, D.W. KNAPP, T. KENNEDY-BOWDOIN, M.O. JONES, R.E. MARTIN, J. BOARDMAN & R.F. HUGHES (2008):** Invasive species detection in Hawaiian rainforests using airborne imaging spectroscopy and LiDAR. *Remote Sensing of Environment* 112: 1942–1955.
- C. ATZBERGER & W. WERNER (1998):** Needle reflectance of healthy and diseased spruce stands. *Proc. 1st EarSeL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Zurich, Switzerland, 6–8 October 1998.

- C. ATZBERGER** (2000a): Development of an invertible forest reflectance model: The INFOR-Model. –In: Buchroithner (Ed.): *A decade of trans-european remote sensing cooperation. Proc. 20th EARSeL Symposium* Dresden, Germany, 14–16 June 2000, 39–44.
- C. ATZBERGER** (2000b): INFORM: Ein invertierbares Forstreflexionsmodell zur fernerkundlichen Bestimmung bio-physikalischer Größen. –In: Albertz (Hrsg.): *Photogrammetrie und Fernerkundung*. Publikation der DGPF, 8: 163–173.
- C. ATZBERGER & M. SCHLERF** (2002): Automatisierte Bestimmung der Bestockungsdichte in Nadelwäldern aus räumlich hochauflösenden Ortholuftbildern. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 2002 (3): 171–180.
- C. ATZBERGER** (2003): Möglichkeiten und Grenzen der fernerkundlichen Bestimmung biophysikalischer Vegetationsparameter mittels physikalisch basierter Reflexionsmodelle. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 2003 (1): 51–61.
- C. ATZBERGER** (2004): Object-based retrieval of biophysical canopy variables using artificial neural nets and radiative transfer models. *Remote Sensing of Environment* 93: 53–67.
- P. AXELSSON** (1999): Processing of laser scanner data—algorithms and applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 138–147.
- K. BACKHAUS, B. ERICHSON, W. PLINKE & R. WEIBER** (2003): *Multivariate Analysemethoden*, 10. Auflage. Springer-Verlag, Berlin etc.
- C. BACOUR, S. JACQUEMOUD, Y. TOURBIER, M. DECHAMBRE & J.-P. FRANGI** (2002): Design and analysis of numerical experiments to compare four canopy reflectance models. *Remote Sensing of Environment* 79: 72–83.
- G. BAHRENBERG, E. GIESE & J. NIPPER** (1999): *Statistische Methoden in der Geographie*, Band 1: Univariate und bivariate Statistik. Teubner, Stuttgart, Leipzig.
- E. P. BALTSAVIAS** (1999a): A comparison between photogrammetry and laser scanning. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 83–94.
- E. P. BALTSAVIAS** (1999b): Airborne laser scanning: basic relations and formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 199–214.
- F. BARET, J.G.P.W. CLEVERS & M.D. STEVEN** (1995): The Robustness of Canopy Gap Fraction Estimates from Red and Near-infrared Reflectances: A Comparison of Approaches. *Remote Sensing of Environment* 54: 141–151.
- F. BARET & T. FOURTY** (1997): Estimation of leaf water content and specific leaf weight from reflectance and transmittance measurements. *Agronomie* 17: 455–464.
- M.J. BARNESLEY, J.J. SETTLE, M.A. CUTTER, D.R. LOBB & F. TESTON** (2004): The PROBA/CHRIS Mission: A Low-Cost Smallsat for Hyperspectral Multiangle Observations of the Earth Surface and Atmosphere. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 42 (7): 1512–1520.
- S. BECKER & N. HAALA** (2007): Combined Feature Extraction for Façade Reconstruction. *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, Espoo, September 12–14, 2007, Finland, 44–49.
- A. BERK, L. S. BERNSTEIN, G. P. ANDERSON, P. K. ACHARYA, D. C. ROBERTSON, J. H. CHETWYND & S. M. ADLER-GOLDEN** (1998): MODTRAN Cloud and Multiple Scattering Upgrades with Application to AVIRIS. *Remote Sensing of Environment* 65: 367–375.

- J.B. BLAIR, D.B. COYLE, J.L. BUFTON & D.J. HARDING** (1994): Optimization of an Airborne Laser Altimeter for Remote Sensing of Vegetation and Tree Canopies. *Proc. Int. Geosci. Remote Sens. Symp. II*, Pasadena, Cf., 938–941.
- J.B. BLAIR & M.A. HOFTON** (1999a): Modeling laser altimeter return waveforms over complex vegetation using high-resolution elevation data. *Geophysical Research Letters* 26: 2509–2512.
- J.B. BLAIR, D.L. RABINE & M.A. HOFTON** (1999b): The Laser Vegetation Imaging Sensor: a medium-altitude, digitisation-only, airborne laser altimeter for mapping vegetation and topography. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 115–122.
- D.S. BOYD & R.A. HILL** (2007): Validation of airborne Lidar intensity values from a forested landscape using Hymap data: Preliminary analyses. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, September 12-14, 2007, Finland, 71–76.
- T. BRANDTBERG, T.A. WARNER, R.E. LANDENBERGER & J.B. MCGRAW** (2003): Detection and analysis of individual leaf-off tree crowns in small footprint, high sampling density lidar data from the eastern deciduous forest in North America. *Remote Sensing of Environment* 85: 290–303.
- T. BRANDTBERG** (2007): Classifying individual tree species under leaf-off and leaf-on conditions using airborne lidar. *Photogrammetry & Remote Sensing* 61: 325–340.
- J. BREIDENBACH, B. KOCH, G. KÄNDLER & A. KLEUSBERG** (2006): Comparison of Lidar and InSAR data to estimate tree height in forest inventories. *Proc. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, 14–15 Feb. 2006, Vienna, Austria: 124–133.
- F. BRETAR, A. CHAUVE, J.-S. BAILLY, C. MALLET & A. JACOME** (2009): Terrain surfaces and 3-D landcover classification from small footprint full-waveform lidar data: application to badlands. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 6: 151–205.
- H. BUDDENBAUM & S. SEELING** (2006): Estimating Structural Forest Attributes Using High Resolution, Airborne Hyperspectral and Lidar Imagery. In: T. Koukal & W. Schneider (eds.): *Proc. International Workshop 3D Remote Sensing in Forestry*, Vienna, Feb. 14-15, 2006.
- H. BUDDENBAUM, M. SCHLERF & J. HILL** (2005): Classification of coniferous tree species and age classes using hyperspectral data and geostatistical methods. *International Journal of Remote Sensing* 26: 5453–5465.
- A. CHAUVE, C. VEGA, S. DURRIEU, F. BRETAR, T. ALLOUIS, M. PIERROT DESEILLIGNY & W. PUECH** (2009): Advanced full-waveform lidar data echo detection: Assessing quality of derived terrain and tree height models in an alpine coniferous forest. *International Journal of Remote Sensing* 30 (19): 5211–5228.
- QI CHEN** (2007): Airborne Lidar data processing and information extraction. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 73 (2): 109–112.
- QI CHEN, P. GONG, D. BALDOCCHI & G. XIE** (2007): Filtering airborne laser scanning data with morphological methods. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 73 (2): 175–185.
- J.M. CHEN & J. CIHLAR** (1996): Retrieving Leaf Area Index of boreal conifer forests using Landsat TM images. *Remote Sensing of Environment* 55: 153–162.
- J.M. CHEN & S.G. LEBLANC** (1997): A 4-scale bidirectional reflection model based on canopy architecture. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35: 1316–1337.

- M. CHOPPING, A. NOLIN, G.C. MOISEN, J.V. MARTONCHIK & M. BULL** (2009): Forest canopy height from the Multiangle Imaging SpectroRadiometer (MISR) assessed with high resolution discrete return lidar. *Remote Sensing of Environment* 113: 2172–2185.
- T. COCKS, R. JENSSEN, A. STEWART, I. WILSON & T. SHIELDS** (1998): The HyMap Airborne Hyperspectral Sensor: The System, Calibration and Performance. *1st EARSEL Workshop on Imaging Spectroscopy*, Zurich, October 1998.
- B. COMBAL, F. BARET, M. WEISS, A. TRUBUIL, D. MACÉ, A. PRAGNÈRE, R. MYNENI, Y. KNYAZIKHIN & L. WANG** (2002): Retrieval of canopy biophysical variables from bidirectional reflectance using prior information to solve the ill-posed inverse problem. *Remote Sensing of Environment* 84: 1–15.
- F. COREN & P. STERZAI** (2006): Radiometric Correction in laser scanning. *International Journal of Remote Sensing* 27: 3097–3104.
- A.P. CRACKNELL & L.W.B. HAYES** (1991): Introduction to Remote Sensing. Taylor & Francis, London, New York, Philadelphia.
- P.J. CURRAN** (1989): Remote Sensing of Foliar Chemistry. *Remote Sensing of Environment* 30: 271–278.
- M. DALPONTE, L. BRUZZONE & D. GIANELLE** (2008): Fusion of hyperspectral and LIDAR Remote Sensing Data for Classification of Complex Forest Areas. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 46 (5): 1416–1427.
- F.M. DANSON, D. HETHERINGTON, F. MORSORF, B. KOETZ & B. ALLGÖWER** (2006): Three-dimensional Forest Canopy Structure from Terrestrial Laser Scanning. In: T. Koukal & W. Schneider (eds.): *Proc. International Workshop 3D Remote Sensing in Forestry*, Vienna, Feb. 14-15, 2006.
- R. DARVISHZADEH, A. SKIDMORE, M. SCHLERF & C. ATZBERGER** (2008): Inversion of a radiative transfer model for estimating vegetation LAI and chlorophyll in a heterogeneous grassland. *Remote Sensing of Environment* 112: 2592–2604.
- C.S.T. DAUGHTREY, K.J. RANSON & L.L. BIEHL** (1989): A new technique to measure the spectral properties of Conifer Needles. *Remote Sensing of Environment* 27: 81–91.
- T.P. DAWSON, P.J. CURRAN & S.E. PLUMMER** (1998): LIBERTY—Modeling the Effects of Leaf Biochemical Concentration on Reflectance Spectra. *Remote Sensing of Environment* 65: 50–60.
- D.N.M. DONOGHUE & P.J. WATT** (2006): Using LiDAR to compare forest height estimates from Ikonos and Landsat ETM+ data in Sitka spruce plantation forests. *International Journal of Remote Sensing* 27 (11): 2161–2175
- D.N.M. DONOGHUE, P.J. WATT, N.J. COX & J. WILSON** (2007): Remote Sensing of species mixtures in conifer plantations using LiDAR height and intensity data. *Remote Sensing of Environment* 110: 509–522.
- J.B. DRAKE, R.O. DUBAYAH, D.B. CLARK, R.G. KNOX, J.B. BLAIR, M.A. HOFFTON, R.L. CHAZDON, J.F. WEISHAMPEL & S.D. PRICE** (2002): Estimation of tropical forest structural characteristics using large-footprint lidar. *Remote Sensing of Environment* 79: 305–319.
- H. DUONG, N. PFEIFER & R. LINDENBERGH** (2006): Full waveform analysis: ICESat Laser data for land cover classification. *Proc. ISPRS Comm. VII*, Enschede, Netherlands.

- V. DUCIC, M. HOLLAUS, A. ULLRICH, W. WAGNER & T. MELZER** (2006): 3D vegetation mapping and classifying using full-waveform laser scanning. In: T. Koukal & W. Schneider (eds.): *Proc. International Workshop 3D Remote Sensing in Forestry*, Vienna, Feb. 14-15, 2006.
- L.I. DUNCANSON, K.O. NIEMANN & M.A. WULDER** (2010): Estimating forest canopy height and terrain relief from GLAS waveform metrics. *Remote Sensing of Environment* 114: 138–154.
- A. EINSTEIN** (1917): Zur Quantentheorie der Strahlung. In: A.J. Kox, M.J. Klein & R. Schulmann (Eds.) *The collected Papers of Albert Einstein, Volume 6: The Berlin Years*. Princeton University Press.
- J.S. EVANS & A.T. HUDAK** (2007): A Multiscale Curvature Algorithm for Classifying Discrete Return LiDAR in Forested Environments. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 45 (4): 1029–1038.
- D.L. EVANS, S.D. ROBERTS, J.W. MCCOMBS & R.L. HARRINGTON** (2001): Detection of Regularly Spaced Targets in Small-Footprint LIDAR Data: Research Issues for Consideration. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 67: 1133–1136.
- H. FANG, S. LIANG & A. KUUSK** (2003): Retrieving leaf area index using a genetic algorithm with a canopy radiative transfer model. *Remote Sensing of Environment* 85: 257–270.
- J.-P. FERET, C. FRANÇOIS, G.P. ASNER, A.A. GITELSON, R.E. MARTIN, L.P.R. BIDEL, S.L. USTIN, G. LE MAIRE & S. JACQUEMOUD** (2008): PROSPECT-4 und 5: Advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. *Remote Sensing of Environment* 112: 3030–3043.
- R. FERNANDES, J.R. MILLER, B. HU & I.G. RUBINSTEIN** (2002): A multi-scale approach to mapping effective Leaf Area Index in Boreal *Picea mariana* stands using high spatial resolution CASI imagery. *International Journal of Remote Sensing* 23: 3547–3568.
- G. M. FOODY** (2002): Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment* 80: 185–201.
- S.E. FRANKLIN** (1994): Discrimination of Subalpine Forest Species and Canopy Density Using Digital CASI, SPOT PLA, and Landsat TM Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 60 (10): 1233–1241.
- B.-C. GAO & A.F.H. GOETZ** (1995): Retrieval of equivalent water thickness and information related to biochemical components of vegetation canopies from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment* 52: 155–162.
- C.S. GARDNER** (1992): Ranging Performance of Satellite Laser Altimeters. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 30 (5): 1061–1072.
- G.W. GEERLING, M. LABRADOR-GARCIA, J.G.P.W. CLEVERS, A.M.J. RAGAS & A.J.M. SMITS** (2007): Classification of floodplain vegetation by data fusion of spectral (CASI) and LiDAR data. *International Journal of Remote Sensing* 28: 4263–4284.
- GEOLAS CONSULTING** (o. J.): LiteMapper GeocodeMF User's Manual.
- A. GHIYAMAT & H.Z.M. SHAFRI** (2010): A review on hyperspectral remote sensing for homogeneous and heterogeneous forest biodiversity assessment. *International Journal of Remote Sensing* 31 (7): 1837–1856.
- T. GOBAKKEN & E. NÆSSET** (2005): Weibull and percentile models for lidar-based estimation of basal area distribution. *Scandinavian Journal of Forest Research* 20: 490–502.

- N.S. GOEL** (1988): Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. *Remote Sensing Reviews* 4: 1–212.
- A.F.H. GOETZ** (2009): Three decades of hyperspectral remote sensing of the Earth: A personal view. *Remote Sensing of Environment*, 113, Supplement 1: S5–S16.
- A.A. GREEN, M. BERMAN, P. SWITZER & M.D. CRAIG** (1988): A Transformation for Ordering Multispectral Data in Terms of Image Quality with Implications for Noise Removal. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 26: 65–74.
- J.A. GREENBERG, S.Z. DOBROWSKI & S.L. USTIN** (2005): Shadow allometry: Estimating tree structural parameters using hyperspatial image analysis. *Remote Sensing of Environment* 97: 15–25.
- D.J. HARDING & C.C. CARABAJAL** (2005): ICESat waveform measurements of within-footprint topographic relief and vegetation vertical structure. *Geophysical Research Letters*, Vol. 32, L21S10, doi: 10.1029/2005GL023471.
- R. A. HAUGERUD & D. J. HARDING** (2001): Some algorithms for virtual deforestation (VDF) of Lidar topographic survey data. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, XXXIV-3/W4: 211–217.
- J. HEDLEY, C. ROELFSMA & S.R. PHINN** (2009): Efficient radiative transfer model inversion for remote sensing applications. *Remote Sensing of Environment* 113: 2527–2532.
- S. HESE, W. LUCHT, C. SCHMULLIUS, M. BARNSLEY, R. DUBAYAH, D. KNORR, K. NEUMANN, T. RIEDEL & K. SCHRÖTER** (2005): Global biomass mapping for an improved understanding of the CO<sub>2</sub> balance—the Earth observation mission Carbon-3D. *Remote Sensing of Environment* 94: 94–104.
- G.D. HICKMAN & J.E. HOGG** (1969): Application of an Airborne Pulsed Laser for Near Shore Bathymetric Measurements. *Remote Sensing of Environment* 1: 47–58.
- G. HILDEBRANDT** (1996): Fernerkundung und Luftbildmessung. Wichmann, Heidelberg.
- J. HILL & B. STURM** (1991): Radiometric Correction of multi-temporal Thematic Mapper data for use in agricultural land-cover classification and vegetation monitoring. *International Journal of Remote Sensing* 12: 1471–1491.
- J.M. HILL, L.A. GRAHAM & R.J. HENRY** (2000): Wide-Area Topographic Mapping and Applications Using Airborne Light Detection and Ranging (LIDAR) Technology. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 66 (8): 908–914.
- J. HILL** (2002): Sensorkalibration und atmosphärische Korrektur von hyperspektralen Fernerkundungsdaten (HyMap). In: P. Müller, S. Rumpf & H. Monheim (Hrsg.): Umwelt und Region - Aus der Werkstatt des Sonderforschungsbereichs 522. Selbstverlag, Trier: 163–173.
- J. HILL & W. MEHL** (2003): Georadiometrische Aufbereitung multi- und hyperspektraler Daten zur Erzeugung langjähriger kalibrierter Zeitreihen. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2003 (1): 7–14.
- J. HILL** (2009): State-of-the-Art and Review of Algorithms with Relevance for Retrieving Biophysical and Structural Information on Forests and Natural Vegetation with Hyperspectral Remote Sensing Systems. In: H. Kaufmann, K. Segl, S. Itzerott, H. Bach, A. Wagner, J. Hill, B. Heim, K. Oppermann, W. Heldens, E. Stein, A. Müller, S. van der Linden, P. J. Leitão, A. Rabe & P. Hostert (2010): Hyperspectral algorithms: report in the frame of EnMAP preparation activities. Scientific Technical Report



- STR10/08. Potsdam. DOI: 10.2312/GFZ.b103-10089. <http://ebooks.gfz-potsdam.de/pubman/item/escidoc:18089>
- B. HÖFLE & N. PFEIFER** (2007): Correction of laser scanning intensity data: Data and model-driven approaches. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 62: 415–433.
- M.A. HOFTON, J.B. MINSTER & B.J. BLAIR** (2000): Decomposition of Laser Altimeter Waveform. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 38 (4): 1989–1996.
- B.N. HOLBEN, T.F. ECK, I. SLUTSKER, D. TANRÉ, J.P. BUIS, A.SETZER, E. VERMOTE, J.A. REAGAN, Y.J. KAUFMAN, T. NAKAJIMA, F. LAVENU, I. JANKOWIAK & A. SMIRNOV** (1998): AERONET—A Federated Instrument Network and Data Archive for Aerosol Characterization. *Remote Sensing of Environment* 66: 1–6.
- C. HOPKINSON, L. CHASMER & R.J. HALL** (2008): The uncertainty in conifer plantation growth prediction from multi-temporal lidar datasets. *Remote Sensing of Environment* 112: 1168–1180.
- C. HOPKINSON & L. CHASMER** (2009): Testing LiDAR models of fractional cover across multiple forest ecozones. *Remote Sensing of Environment* 113: 275–288.
- C.J. HOULDCROFT, C.L. CAMPBELL, I.J. DAVENPORT, R.J. GURNEY & NICK HOLDEN** (2005): Measurement of Canopy Geometry Characteristics using LiDAR Laser Altimetry: A Feasibility Study. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 43 (10): 2270–2282.
- B. HU, J. INANNEN & J.R. MILLER** (2000): Retrieval of Leaf Area Index and Canopy Closure from CASI Data over the BOREAS Flux Tower Sites. *Remote Sensing of Environment* 74: 255–274.
- W.D. HUDSON & C.W. RAMM** (1987): Correct Formulation of the Kappa Coefficient of Agreement. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 53 (4): 421–422.
- C. HUG, A. ULLRICH & A. GRIMM** (2005): Litemapper-5600 – A Waveform-digitizing Lidar Terrain and Vegetation mapping System. In: M. Thies, B. Koch, H. Spiecker & H. Weinacker (eds.): *Proc. ISPRS Workshop Laser Scanners for Forest and Landscape Assessment*, Freiburg, Germany, 3–6 October 2004. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVI - 6/W2.
- E.J. HUISING & L.M. GOMES PEREIRA** (1998): Errors and accuracy estimates of laser data acquired by various laser scanning systems for topographic applications. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 53: 245–261.
- P. HYDE, R. DUBAYAH, B. PETERSON, J.B. BLAIR, M. HOFTON, C. HUNSAKER, R. KNOW & W. WALKER** (2005): Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using waveform Lidar: Validation of montane ecosystems. *Remote Sensing of Environment* 96: 427–437.
- P. HYDE, R. DUBAYAH, W. WALKER, J.B. BLAIR, M. HOFTON & C. HUNSAKER** (2006): Mapping forest structure for wildlife habitat analysis using multi-sensor (LiDAR, SAR/InSAR, ETM+, Quickbird) synergy. *Remote Sensing of Environment* 102: 63–73.
- J. HYYPPÄ & M. HALLIKAINEN** (1996): Applicability of Airborne Profiling Radar to Forest Inventory. *Remote Sensing of Environment* 57: 39–57.
- J. HYYPPÄ, U. PYYSALO, H. HYYPPÄ & A. SAMBERG** (2000): Elevation accuracy of laser scanning-derived digital terrain and target models in forest environment. *Proceedings of EARSeL-SIG-Workshop LiDAR*, Dresden/FRG, June 16 – 17, 2000.

- J. HYYPPÄ, O. KELLE, M. LEHIKONEN & M. INKINEN** (2001): A Segmentation-Based Method to Retrieve Stem Volume Estimates from 3-D Tree Height Models Produced by Laser Scanners. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39 (5): 969–975.
- J. HYYPPÄ, X. YU, H. HYYPPÄ & M. MALTAMO** (2006): Methods of Airborne Laser Scanning for Forest Information Extraction. *Proc. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, 14–15 Feb. 2006, Vienna, Austria: 63–78.
- J. HYYPPÄ, H. HYYPPÄ, D. LECKIE, F. GOUGEON, X. YU & M. MALTAMO** (2008): Review of methods of small-footprint airborne laser scanning for extracting forest inventory data in boreal forests. *International Journal of Remote Sensing* 29 (5): 1339–1366.
- M.L. IMHOFF** (1995): Radar Backscatter and Biomass Saturation: Ramifications for Global Biomass Inventory. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 33 (2): 511–518.
- IPCC** (2000): Land Use, Land-Use Change and Forestry: A special report of the IPCC. [www.grida.no/Climate/ipcc/land\\_use/](http://www.grida.no/Climate/ipcc/land_use/) (30.09.2008).
- M. IQBAL** (1983): An Introduction to Solar Radiation. AP Academic Press, Toronto etc.
- ITT** (2007): IDL Reference Guide. November 2007 Edition. [www.itvis.com/portals/0/pdfs/idl/ref-guide.pdf](http://www.itvis.com/portals/0/pdfs/idl/ref-guide.pdf) (01.12.2007).
- ITT** (2009): Envi Reference Guide. February 2009 Edition. [www.itvis.com/portals/0/pdfs/envi/Reference\\_Guide.pdf](http://www.itvis.com/portals/0/pdfs/envi/Reference_Guide.pdf) (12.05.2009).
- S. JACQUEMOUD & F. BARET** (1990): PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. *Remote Sensing of Environment* 34, 75–91.
- S. JACQUEMOUD** (1993): Inversion of the PROSPECT+ SAIL Canopy Reflectance Model from AVIRIS Equivalent Spectra: Theoretical Study. *Remote Sensing of Environment* 44: 281–292.
- S. JACQUEMOUD, F. BARET, B. ANDRIEU, F.M. DANSON & J. JAGGARD** (1995): Extraction of Vegetation Biophysical Parameters by Inversion of the PROSPECT + SAIL Models on Sugar Beet Canopy Reflectance Data. Application to TM and AVIRIS Sensors. *Remote Sensing of Environment* 52: 163–172.
- S. JACQUEMOUD, S.L. USTIN, J. VERDEBOUT, G. SCHMUCK, G. ANDREOLI & B. HOSGOOD** (1996): Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. *Remote Sensing of Environment* 56: 194–202.
- S. JACQUEMOUD, C. BACOUR, H. POILVÉ & J.-P. FRANGI** (2000): Comparison of four Radiative Transfer Models to simulate Plant Canopy Reflectance: Direct and Inverse Mode. *Remote Sensing of Environment* 74: 471–481.
- S. JACQUEMOUD & S.L. USTIN** (2001): Leaf optical properties: A State of the Art. *Proc. 8th Int. Symp. Physical Measurements & Signatures in Remote Sensing*, Aussois, France, 223–232.
- S. JACQUEMOUD, W. VERHOEF, F. BARET, C. BACOUR, P.J. ZARCO-TEJADA, G.P. ASNER, C. FRANÇOIS & S.L. USTIN** (2009): PROSPECT + SAIL, A review of use for vegetation characterization. *Remote Sensing of Environment* 113 (Supplement 1): S56–S66.
- L.A. JAMES, D.G. WATSON & W.F. HANSEN** (2007): Using LiDAR data to map gullies and headwater streams under forest canopy: South Carolina, USA. *Catena* 71: 134–144.

- T. JARMER, B. KÖTZ & C. ATZBERGER** (2003): Spektroradiometrische Ableitung biophysikalischer Vegetationsparameter von Weizenbeständen: Vergleichende Untersuchung verschiedener empirisch-statistischer Verfahren. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation*, 2003 (1): 43–50.
- J.L.R. JENSEN, K.S. HUMES, L.A. VIERLING & A.T. HUDAK** (2008): Discrete return lidar-based prediction of leaf area index in two conifer forests. *Remote Sensing of Environment* 112: 3947–3957.
- I. JONCKHEERE, S. FLECK, K. NACKAERTS, B. MUYS, P. COPPIN, M. WEISS & F. BARET** (2004): Review of methods for in situ leaf area index determination, Part I. Theories, sensors and hemispherical photography. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 19–35.
- R. KATZENBEISSER & S. KURZ** (2004): Airborne Laser-Scanning, ein Vergleich mit terrestrischer Vermessung und Photogrammetrie. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 2004 (3): 179–187.
- T. KEY, T.A. WARNER, J.B. MCGRAW & M.A. FAJVAN** (2001): A Comparison of Multispectral and Multitemporal Information in High Spatial Resolution Imagery for Classification of Individual Tree Species in a Temperate Hardwood Forest. *Remote Sensing of Environment* 75: 100–112.
- J. KILIAN, N. HAALA & M. ENGLISH** (1996): Capture and evaluation of airborne laser scanner data. *Int. Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 31/3, ISPRS, Vienna, Austria.
- K. KIM, P. TREITZ, M. WULDER, B. ST-ONGE & M. FLOOD** (2003): LiDAR remote sensing of forest structure. *Progress in Physical Geography* 27 (1): 88–106.
- S. KIM, R.J. MCGAUGHEY, H.-E. ANDERSEN & G. SCHREUDER** (2009): Tree species differentiation using intensity data derived from leaf-on and leaf-off airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 113: 1575–1586.
- D.S. KIMES, Y. KNYAZIKHIN, J.L. PRIVETTE, A.A. ABUELGASIM & F. GAO** (2000): Inversion Methods for Physically-Based Models. *Remote Sensing Reviews* 18 (2–4): 381–439.
- D. KIMES, J. GASTELLU-ETCHEGORRY & P. ESTÈVE** (2002): Recovery of forest canopy characteristics through inversion of a complex 3D model. *Remote Sensing of Environment* 79: 320–328.
- B. KOCH, U. HEYDER & H. WEINACKER** (2006a): Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 72 (4): 357–363.
- B. KOCH, U. HEYDER, C. STRAUB & H. WEINACKER** (2006b): 3D data for forest and environmental planning. *Proc. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, 14–15 Feb. 2006, Vienna, Austria: 1–8.
- B. KOCH, C. STRAUB, M. DEES, Y. WANG & H. WEINACKER** (2008): Airborne laser data for stand delineation and information extraction. *International Journal of Remote Sensing* 30 (4): 935–963.
- B. KÖTZ, M. SCHAEPMAN, F. MORSDORF, P. BOWYER, K. ITTEN & B. ALLGÖWER** (2004): Radiative transfer modeling within a heterogeneous canopy for estimation of forest fire fuel properties. *Remote Sensing of Environment* 92: 332–344.
- B. KOETZ, M. KNEUBÜHLER, J.-L. WIDLÓWSKI, F. MORSDORF, M. SCHAEPMAN & K. ITTEN** (2005): Assessment of Canopy Structure and Heterogeneity from Multi-angular CHRIS-PROBA Data. 9th International Symposium on Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing (ISPMSRS), Beijing, China: 73–78.

- B. KOETZ, F. MORSDORF, G. SUN, K.J. RANSON, K. ITTEN & B. ALLGÖWER (2006):** Inversion of a Lidar waveform model for forest biophysical parameter estimation. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters* 3: 49–53.
- B. KOETZ, G. SUN, F. MORSDORF, K.J. RANSON, M. KNEUBÜHLER, K. ITTEN & B. ALLGÖWER (2007):** Fusion of imaging spectrometer and LIDAR data over combined radiative transfer models for forest canopy characterization. *Remote Sensing of Environment* 106: 449–459.
- B. KOETZ, F. MORSDORF, S. VAN DER LINDEN, T. CURT & B. ALLGÖWER (2008):** Multi-source land cover classification for forest fire management based on imaging spectrometry and LiDAR data. *Forest Ecology and Management* 256: 263–271.
- M. KÖHL, S.S. MAGNUSSEN & M. MARCHETTI (2006):** Sampling Methods, Remote Sensing and GIS Multire-source Forest Inventory. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- M. KÖHL & M. LAUTNER (2001):** Erfassung von Waldökosystemen durch Hyperspektraldaten. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 2001 (2): 107–117.
- S. KOUKOULAS & G.A. BLACKBURN (2005):** Mapping individual tree location, height and species in broad-leaved deciduous forest using airborne LIDAR and multi-spectral remotely sensed data. *International Journal of Remote Sensing* 26 (3): 431–455.
- S.Y. KOTCHENOVA, N.V. SHABANOV, Y. KNYAZIKHIN, A.B. DAVIS, R. DUBAYAH & R.B. MYNENI (2003):** Modeling lidar waveforms with time-dependent stochastic radiative transfer theory for remote estimations of forest structure. *Journal of Geophysical Research* 108 (D15, 4484): ACL 12-1–13. Doi: 10.1029/2002JD003288.
- K. KRAUS & W. SCHNEIDER (1988):** Fernerkundung, Band 1 – Physikalische Grundlagen und Aufnahmetechniken. Ferd. Dummlers Verlag, Bonn.
- K. KRAUS & N. PFEIFER (2001):** Advanced DTM generation from Lidar data. *IAPRS Vol. XXXIV, 3/W4*, Annapolis, MD, USA, 2001.
- K. KRAUS (2004):** Photogrammetrie Band 1 – Geometrische Informationen aus Photographien und Laserscanneraufnahmen. De Gruyter, Berlin, New York.
- A. KUUSK (1994):** A multispectral canopy reflectance model. *Remote Sensing of Environment* 50, 75–82.
- A. KUUSK (1995a):** A markov chain model of canopy reflectance. *Agricultural and Forest Meteorology* 76, 221–236.
- A. KUUSK (1995b):** A fast, invertible Canopy Reflectance Model. *Remote Sensing of Environment* 51: 342–350.
- A. KUUSK & T. NILSON (2000):** A directional multispectral forest reflectance model. *Remote Sensing of Environment* 72, 244–252.
- A. KUUSK (2001):** A two-layer canopy reflectance model. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 71, 1–9.
- A. KUUSK & T. NILSON (2005):** Forest Reflectance and Transmittance – FRT User Guide, Version 05.2005. <http://www.aai.ee/bgf/frt/frtman0505.pdf> (21.09.2007).
- G. LE MAIRE, C. FRANÇOIS & E. DUFRÈNE (2004):** Towards universal broad leaf chlorophyll indices using PROSPECT simulated database and hyperspectral reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment* 89: 1–28.

- A.C. LEE & R.M. LUCAS** (2007): A LiDAR-derived canopy density model for tree stem and crown mapping in Australian forests. *Remote Sensing of Environment* 111: 493–518.
- K.-S. LEE, W.B. COHEN, R.E. KENNEDY, T.K. MAISPERGER & S. T. GOWER** (2004): Hyperspectral versus multispectral data for estimating leaf area index in four different biomes. *Remote Sensing of Environment* 91: 508–520.
- M.A. LEFSKY, D.J. HARDING, W.B. COHEN, G. PARKER & H.H. SHUGART** (1999a): Surface lidar remote sensing of basal area and biomass in deciduous forests of Eastern Maryland, USA. *Remote Sensing of Environment* 67: 83–98.
- M.A. LEFSKY, W.B. COHEN, S.A. ACKER, G.G. PARKER, T.A. SPIES & D.J. HARDING** (1999b): Lidar remote sensing of the canopy structure and biophysical properties of Douglas-Fir Western Hemlock forests. *Remote Sensing of Environment* 70: 339–361.
- M.A. LEFSKY, W.B. COHEN, G.G. PARKER & D.J. HARDING** (2002): Lidar Remote Sensing for Ecosystem Studies. *BioScience* 52 (1): 19–30.
- M.A. LEFSKY, D.J. HARDING, M. KELLER, W.B. COHEN, C.C. CARABAJAL, F. DEL BORN ESPIRITO-SANTO, M.O. HUNTER & R. DE OLIVEIRA JR.** (2005): Estimates of forest canopy height and aboveground biomass using ICESat. *Geophysical Research Letters* 32, LS22S02.
- T.M. LILLESAND & R.W. KIEFER** (2000): Remote Sensing and Image Interpretation, 4th Edition. Wiley & Sons, New York u.a.
- W. LINDER** (2006): Digital Photogrammetry – A practical course. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- C.D. LLOYD & P.M. ATKINSON** (2002): Deriving DSMs from LiDAR data with kriging. *International Journal of Remote Sensing* 23: 2519–2524.
- C.D. LLOYD & P.M. ATKINSON** (2006): Deriving ground digital surface models from LiDAR data with geostatistics. *International Journal of Geographical Information Science* 20 (5): 535–563.
- P. LOHMANN & K. JACOBSEN** (2004): Filterung segmentierter Oberflächenmodelle aus Laserscannerdaten. *Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation* 2004 (4): 279–288.
- B.J. LUZUM, M. STAREK & K.C. SLATTON** (2004): Normalizing ALSM intensities. Geosensing Engineering and Mapping (GEM) CenterReport No. Rep 2004-07-001, Civil and Coastal Engineering Department, University of Florida. [http://www.aspl.ece.ufl.edu/reports/GEM\\_Rep\\_2004\\_07\\_001.pdf](http://www.aspl.ece.ufl.edu/reports/GEM_Rep_2004_07_001.pdf) (26.09.2008).
- S. MAGNUSSEN, E. NÆSSET & M.A. WULDER** (2007): Efficient multiresolution spatial predictions for large data arrays. *Remote Sensing of Environment* 109: 451–463.
- C. MALLET & F. BRETAR** (2009): Full-waveform topographic lidar: State-of-the-art. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 64: 1–16.
- M. MALTAMO, K. EERIKÄINEN, J. PITKÄNEN, J. HYYPPÄ & M. VEHMAS** (2004): Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment* 90: 319–330.
- MATHWORKS** (2008): Matlab 7 Function Reference P–Z. [http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf\\_doc/matlab/refbook3.pdf](http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/pdf_doc/matlab/refbook3.pdf) (21.06.2009)
- H.A. MCCARTNEY** (1978): Spectral distribution of solar radiation. II: global and diffuse. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 104: 911–926.

- R.E. McROBERTS, M.D. NELSON, & D.G. WENDT** (2002): Stratified estimation of forest area using satellite imagery, inventory data, and the k-Nearest Neighbors technique. *Remote Sensing of Environment* 82: 457–468.
- J.E. MEANS, S.A. ACKER, D.J. HARDING, J.B. BLAIR, M.A. LEFSKY, W.B. COHEN, M.E. HARMON & W.A. MCKEE** (1999): Use of large-footprint scanning airborne lidar to estimate forest stand characteristics in the western cascades of Oregon. *Remote Sensing of Environment* 67: 298–308.
- B. MERCER** (2004): DEMs created from Airborne IFSAR – An Update. *Proc. ISPRS Congress Istanbul*, July 12–23, 2004.
- D. MESCHÉDE** (2006): Gerthsen Physik, 23. Auflage. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- T. METTE, F. KUGLER, K. PAPATHANASSIOU & I. HAJNSEK** (2006): Viewing Forest in Pol-InSAR. *Proc. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, 14–15 Feb. 2006, Vienna, Austria: 103–109.
- E.M. MIKHAIL, J. S. BETHEL & J.C. MCGLONE** (2001): Introduction to modern Photogrammetry. Wiley & Sons, New York u.a.
- J. MILLER, M. BERGER, Y. GOULAS, S. JACQUEMOUD, J. LOUIS, G. MOHAMMED, N. MOISE, J. MORENO, I. MOYA, R. PEDRÓS, W. VERHOEF & P. ZARCO-TEJADA** (2005): Development of a Vegetation Fluorescence Canopy Model. ESTEC Contract No. 16365/02/NL/FF, Final Report, May 2005 ([www.ias.csic.es/fluor-mod](http://www.ias.csic.es/fluor-mod)).
- J. MOREIRA, M. SCHWÄBISCH, C. WIMMER, M. ROMBACH & J. MURA** (2001): Surface and ground topography determination in tropical rain forest areas using airborne interferometric SAR. In: D. Fritsch & R. Spiller (Eds.): Photogrammetric Week 01. Wichmann, Heidelberg.
- F. MORSDORF, E. MEIER, B. ALLGÖWER & D. NÜESCH** (2003): Clustering in airborne laser scanning raw data for segmentation of single trees. *Proc. ISPRS working group III/3 workshop "3-D reconstruction from airborne laserscanner and InSAR data"* Dresden, Germany 8-10 October 2003.
- F. MORSDORF, E. MEIER, B. KÖTZ, K.I. ITTEN, M. DOBBERTIN & B. ALLGÖWER** (2004): LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management. *Remote Sensing of Environment* 92: 353–362.
- F. MORSDORF, O. FREY, E. MEIER, K. ITTEN & B. ALLGÖWER** (2006): Assessment on the influence of flying height and scan angle on biophysical vegetation products derived from airborne laser scanning. *Proc. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry*, 14–15 Feb. 2006, Vienna, Austria: 145–150.
- F. MORSDORF, O. FREY, B. KOETZ & E. MEIER** (2007): Ray Tracing for Modeling of Small Footprint Airborne Laser Scanning Returns. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume XXXVI, Part 3 / W52, pp. 294-299.
- F. MORSDORF, O. FREY, E. MEIER, K. ITTEN & B. ALLGÖWER** (2008): Assessment of the influence of flying altitude and scan angle on biophysical vegetation products derived from airborne laser scanning. *International Journal of Remote Sensing* 29 (5): 1387–1406.
- F. MORSDORF, C. NICHOL, T. MALTHUS & I.H. WOODHOUSE** (2009): Assessing forest structural and physiological information content of multi-spectral LiDAR waveforms by radiative transfer modeling. *Remote Sensing of Environment* 113: 2152–2163.
- R. NANDAKUMAR, A. M. ALURKAR, B. G. KRISHNA & P. K. SRIVASTAVA** (2004): SPOT-5 HRS along-track stereo data evaluation over Montmirail and Melbourne test sites. *Proc. ISPRS Congress Istanbul*, July 12–23, 2004.

- E. NÆSSET** (1997a): Determination of mean tree height of forest stands using airborne laser scanner data. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 52: 49–56.
- E. NÆSSET** (1997b): Estimating Timber Volume of Forest Stands using airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 61: 246–253.
- E. NÆSSET & T. ØKLAND** (2002): Estimating tree height and tree crown properties using airborne scanning laser in a boreal nature reserve. *Remote Sensing of Environment* 79: 105–115.
- E. NÆSSET** (2005): Assessing sensor effects and effects of leaf-off and leaf-on canopy conditions on biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 98: 356–370.
- E. NÆSSET & T. GOBAKKEN** (2008): Estimation of above- and below-ground biomass across regions of the boreal forest zone using airborne laser. *Remote Sensing of Environment* 112: 3079–3090.
- E. NÆSSET** (2009a): Effects of different sensors, flying altitudes, and pulse repetition frequencies on forest canopy metrics and biophysical stand properties derived from small-footprint airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 113: 148–159.
- E. NÆSSET** (2009b): Influence of terrain model smoothing and flight and sensor configurations on detection of small pioneer trees in the boreal–alpine transition zone utilizing height metrics derived from airborne scanning lasers. *Remote Sensing of Environment* 113: 2210–2223.
- R. NELSON, W. KRABILL & G. MACLEAN** (1984): Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 15: 201–212.
- R. NELSON, W. KRABILL & J. TONELLI** (1988): Estimating forest biomass and volume using Airborne Laser Data. *Remote Sensing of Environment* 24: 247–267.
- R. NELSON** (1997): Modeling forest canopy heights: The effect of canopy shape. *Remote Sensing of Environment* 60: 32–334.
- R. NELSON, H. HYDE, P. JOHNSON, B. EMESSIENE, M.L. IMHOFF, R. CAMPBELL & W. EDWARDS** (2007): Investigating RaDAR–LiDAR synergy in a North Carolina pine forest. *Remote Sensing of Environment* 110: 98–108.
- F.E. NICODEMUS, J.C. RICHMOND, J.J. HSIA, I.W. GINSBERG & T. LIMPERIS** (1977): Geometrical considerations and nomenclature for reflectance. National Bureau of Standards, US Department of Commerce, Washington, DC, USA.
- T. NILSON & A. KUUSK** (1989): A reflectance model for the homogeneous plant canopy and its inversion. *Remote Sensing of Environment* 27: 157–167.
- T. NILSON & U. PETERSON** (1991): A Forest Reflectance Model and a Test Case. *Remote Sensing of Environment* 37: 131–142.
- T. NILSON & A. KUUSK** (2004): Improved algorithm for estimating canopy indices from gap fraction data in forest canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 124, 157–169.
- M. NILSSON** (1988): Estimation of tree heights and stand volume using an airborne lidar system. *Remote Sensing of Environment* 56: 1–7.
- M. NILSSON** (2002): Deriving nationwide estimates of forest variables for Sweden using Landsat ETM+ and field data. Proc. ForestSAT Symposium, Heriot Watt University, Edinburgh.

- R.A. OLEA** (1999): Geostatistics for Engineers and Earth Scientists. Kluwer Academic Publications, Boston, Dordrecht, London.
- H.O. ØRKA, E. NÆSSET & O.M. BOLLANDSÅS** (2009): Classifying species of individual trees by intensity and structure features derived from airborne laser scanner data. *Remote Sensing of Environment* 113: 1163–1174.
- K.P. PAPANASSIOU & S.R. CLOUDE** (2001): Single-Baseline Polarimetric SAR Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing* 39: 2352–2363.
- G.G. PARKER, M.A. LEFSKY & D.J. HARDING** (2001): Light transmittance in forest canopies determined using airborne laser altimetry and in-canopy quantum measurements. *Remote Sensing of Environment* 76: 298–309.
- G. PATENAUDE, R.A. HILL, R. MILNE, D.L.A. GAVEAU, B.B.J. BRIGGS & T.P. DAWSON** (2004): Quantifying forest above ground carbon content using LiDAR remote sensing. *Remote Sensing of Environment* 93: 368–380.
- R. PEDRÓS, Y. GOULAS, S. JACQUEMOUD, J. LOUIS & S. JACQUEMOUD** (2010): FluorMODleaf: A new leaf fluorescence emission model based on the PROSPECT model. *Remote Sensing of Environment* 114: 155–167.
- Å. PERSSON, J. HOLMGREN & U. SÖDERMAN** (2002): Detecting and Measuring Individual Trees Using an Airborne Laser Scanner. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 68 (9): 925–932.
- Å. PERSSON, U. SÖDERMAN, J. TÖPEL & S. AHLBERG** (2005): Visualization and analysis of full-waveform airborne laser scanner data. *ISPRS WG III/3, III/4, V/3 Workshop Laser Scanning 2005*, Enschede, NL, 12–14 Sep. 2005.
- S.C. POPESCU, R.H. WYNNE & R.F. NELSON** (2002): Estimating plot-level tree heights with lidar: local filtering with a canopy-height based variable window size. *Computers and electronics in agriculture* 37: 71–95.
- S.C. POPESCU & K. ZHAO** (2008): A voxel-based lidar method for estimating crown base height for deciduous and pine trees. *Remote Sensing of Environment* 112: 767–781.
- W.H. PRESS, S.A. TEUKOLSKY, W.T. VETTERLING & B.P. FLANNERY** (1992): Numerical Recipes in FORTRAN, the Art of Scientific Computing, Second Edition. Cambridge University Press.
- J.C. PRICE** (1990): On the information content of soil reflectance spectra. *Remote Sensing of Environment* 33: 113–121.
- V. RADELOFF, J. HILL & W. MEHL** (1997): Forest mapping from space – Enhanced satellite data processing by spectral mixture analysis and topographic corrections. EUR 17702 EN, European Commission, Brussels/Luxembourg.
- M.Z.A. RAHMAN & B. GORTE** (2008): Tree filtering for high density airborne LiDAR data. *Proc. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, Espoo, Finland, September 12–14, 2007, 332–337.
- M. RAUTIAINEN, J. SUOMALAINEN, M. MÖTTUS, P. STENBERG, P. VOIPO, J. PELTONIEMI & T. MANNINEN** (2007): Coupling forest canopy and understory reflectance in the Arctic latitudes of Finland. *Remote Sensing of Environment* 110: 332–343.



- H. REICHERT & J. STETS** (1980): Der südwestliche Hunsrück – Hochwald und Idarwald. Rheinische Landschaften, Heft 17, Köln.
- J. REITBERGER, P. KRZYSZEK & M. HEURICH** (2006): Full-waveform Analysis of small footprint Airborne Laser Scanning data in the Bavarian Forest National Park for tree species classification. In: T. Koukal & W. Schneider (eds.): *Proc. International Workshop 3D Remote Sensing in Forestry*, Vienna, Feb. 14-15, 2006.
- J. REITBERGER, M. HEURICH, P. KRZYSZEK & U. STILLA** (2007a): Single Tree detection in forest areas with high-density Lidar data. In: U. Stilla et al. (eds.): *PIA07. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, 36 (3/W49B), 139–144.
- J. REITBERGER, P. KRZYSZEK & U. STILLA** (2007b): Combined tree segmentation and stem detection using full waveform Lidar data. *Proc. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, Espoo, Finland, September 12-14, 2007, 332–337.
- J. REITBERGER, P. KRZYSZEK & U. STILLA** (2008): Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1407–1431.
- D. RIAÑO, E. MEIER, B. ALLGÖWER, E. CHUVIECO & S.L. USTIN** (2003): Modeling airborne laser scanning data for the spatial generation of critical forest parameters in fire behavior modeling. *Remote Sensing of Environment* 86: 177–186.
- D. RIAÑO, F. VALLADARES, S. CONDÉS & E. CHUVIECO** (2004): Estimation of leaf area index and covered ground from airborne laser scanner (Lidar) in two contrasting forests. *Agricultural and Forest Meteorology* 124: 269–275.
- W. RIEGER, O. ECKMÜLLNER, H. MÜLLNER & T. REITER** (1999): Laser-Scanning for the derivation of forest stand parameters. Workshop of ISPRS WG III/2 & III/5: Mapping surface structure and topography by airborne and spaceborne lasers. 7.–9.11.1999 La Jolla, CA. *Int. Arch. of Photog. & Rem. Sens.*, Vol. 32, Part3-W14, 193–200.
- P. RIEGER, A. ULLRICH & R. REICHERT** (2006): Laser scanners with echo digitization for full waveform analysis. In: T. Koukal & W. Schneider (eds.): *Proceedings of the International Workshop 3D Remote Sensing in Forestry*, Vienna, Feb. 14–15, 2006.
- RIEGL Laser Measurement Systems** (2006): Airborne Laser Scanner LMS-Q560 for full Waveform Analysis. [http://www.riegl.com/airborne\\_scanners/lms\\_q560\\_/datasheet\\_lmsq560.pdf](http://www.riegl.com/airborne_scanners/lms_q560_/datasheet_lmsq560.pdf) (21. 02. 2006).
- J.C. Ritchie, T.J. Jackson, J.D. Garbrecht, E.H. Grissinger, J.B. Murphey, J.H. Everitt, D.E. Escobar, M.R. Davis & M.A. Weltz** (1993): Studies using an airborne laser altimeter to measure landscape properties. *Hydrological Sciences Journal* 38: 403–416.
- N. ROBINSON** (1966): *Solar Radiation*. Elsevier Publishing Company, Amsterdam, London, New York.
- A. ROSEMA, W. VERHOEF, N. NOORBERGEN & J.J. BORGESIU** (1992): A new Forest Light Interaction Model in Support of Forest Monitoring. *Remote Sensing of Environment* 42: 23–41.
- J.A. ROSETTE, P.R.J. NORTH, J.C. SUÁREZ & J.D. ARMSTON** (2009): A comparison of biophysical parameter retrieval for forestry using airborne and satellite LiDAR. *International Journal of Remote Sensing* 30 (19): 5229–5237.
- S. W. RUNNING, D.L. PETERSON, M.A. SPANNER & K.B. TEUBER** (1986): Remote sensing of coniferous forest leaf area. *Ecology* 67: 273–276.

- H. SCHEEL** (2007): Ableitung von Topographie und Vegetationsstruktur aus Daten eines hochauflösenden Laser-Abtasters. Diplomarbeit Universität Trier, unveröffentlicht.
- D. SCHLÄPFER, M. SCHAEPMANN & K. ITTEN** (1998): PARGE: Parametric geocoding based on GCP-calibrated auxiliary data. *SPIE International Symposium on Optical Sciences, Engineering, and Instrumentation*, San Diego (CA), 334–444.
- D. SCHLÄPFER & R. RICHTER** (2002): Geo-atmospheric processing of airborne imaging spectrometry data. Part 1: parametric orthorectification. *International Journal of Remote Sensing* 23 (13): 2609–2630.
- M. SCHLERF, C. ATZBERGER & J. HILL** (2005): Remote Sensing of forest biophysical variables using HyMap imaging spectrometer data. *Remote Sensing of Environment* 95: 177–194.
- M. SCHLERF & C. ATZBERGER** (2006): Inversion of a forest reflectance model to estimate structural canopy variables from hyperspectral remote sensing data. *Remote Sensing of Environment* 100: 281–294.
- M. SCHLERF, W. VERHOEF, H. BUDDENBAUM, J. HILL, C. ATZBERGER & A. SKIDMORE** (2007): comparing three canopy reflectance models with hyperspectral multi-angular satellite data. *Proc. 10th International Symposium on Physical Measurements and Spectral Signatures in Remote Sensing*, Davos (Switzerland), 12–14 March 2007: 404–407.
- M. SCHLERF, C. ATZBERGER, J. HILL, H. BUDDENBAUM, W. WERNER & G. SCHÜLER** (2010): Retrieval of chlorophyll and nitrogen in Norway spruce (*Picea Abies* L. Karst.) using imaging spectroscopy. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 12: 17–26.
- J.R. SCHOTT** (1997): Remote Sensing – The Image Chain Approach. Oxford University Press, New York, Oxford.
- H. SCHREIER, J. LOUGHEED, C. TUCKER & D. LECKIE** (1985): Automated measurement of terrain reflection and height variations using an airborne infrared laser system. *International Journal of Remote Sensing* 6 (1); 101–113.
- G. SCHÜLER** (2007): Wasserrückhalt im Wald – Ein Beitrag zum vorbeugenden Hochwasserschutz. In: G. Schüler, I. Gellweiler & S. Seeling (Hrsg.): Dezentraler Wasserrückhalt in der Landschaft durch vorbeugende Maßnahmen der Waldwirtschaft, der Landwirtschaft und im Siedlungswesen. Mitteilungen aus der Forschungsanstalt für Waldökologie und Forstwirtschaft Rheinland-Pfalz Nr. 64/07, 7–20.
- B. SITTLER** (2004): Revealing Historical Landscapes by using Airborne Laser Scanning - A 3-D Modell of Ridge and Furrow in Forests near Rastatt (Germany). *Proc. ISPRS working group VIII/2 'Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment'*, Freiburg, Germany 3–6 October 2004, International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Volume XXXVI, Part 8/W2, 258–261.
- S. SOLBERG, E. NÆSSET, K.H. HANSEN & E. CHRISTIANSEN** (2006): Mapping defoliation during a severe insect attack on Scots pine using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 102: 364–376.
- S. SOLBERG, A. BRUNNER, K.H. HANSEN, H. LANGE, E. NÆSSET, M. RAUTIAINEN & P. STENBERG** (2009): Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 113: 2317–2327.

- B. ST-ONGE, Y. HU & C. VÉGA** (2006): Reconstructing Forest Canopy Height Using Stereo-Ikonos Panchromatic Images and a LIDAR DTM. *International Workshop 3D Remote Sensing in Forestry*, Vienna, Feb. 14-15, 2006: 97–102.
- J. STOFFELS, M. VOHLAND, C. HAU & J. HILL** (2007): Ableitung der Stammzahl aus Satellitenbilddaten. *AFZ-Der Wald* 12/2007: 653–655.
- D.R. STREUTKER & N.F. GLENN** (2006): LiDAR measurement of sagebrush steppe vegetation heights. *Remote Sensing of Environment* 102: 135–145.
- J. STUCKENS, W.W. VERSTRAETEN, S. DELALIEUX, R. SWENNEN & P. COPPIN** (2009): A dorsiventral leaf radiative transfer model: Development, validation and improved inversion techniques. *Remote Sensing of Environment* 113: 2560–2573.
- G.H. SUITS** (1972): The calculation of the directional reflectance of a vegetative canopy. *Remote Sensing of Environment* 2: 117–125.
- D. TANRÉ, P. DUHAUT & M. HERMAN** (1990): Description of a computer code to simulate the signal in the solar spectrum: the 5S code. *International Journal of Remote Sensing* 11(4): 659–668.
- K. TANSEY, N. SELMES, A. ANSTEE, N. J. TATE & A. DENNISS** (2008): Estimating tree and stand variables in a Corsican Pine woodland from terrestrial laser scanner data. *International Journal of Remote Sensing* 30 (19): 5195–5209.
- K.-H. THIEL & A. WEHR** (2004): Performance capabilities of laser scanners – an overview and measurement principle analysis. In: M. Thies, H. Spiecker, H. Weinacker & B. Koch (Eds.): *Proc. ISPRS WG 8/2, Laser-Scanners for Forest and Landscape Assessment*. Int. Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Sensing. Freiburg, 3–6 Oct. 2004.
- V. THOMAS, P. TREITZ, J.H. MCCAUGHEY, T. NOLAND & L. RICH** (2008): Canopy chlorophyll concentration estimation using hyperspectral and lidar data for boreal mixedwood forest in northern Ontario, Canada. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1029–1052.
- E. TOMPPA** (2000): National forest inventory of Finland and its role estimating the carbon balance of forest. *Biotechnology, Agronomy, Society and Environment* 4 (4): 281–284.
- C. M. TROTTER, J. R. DYMOND & C. J. GOULDING** (1997): Estimation of timber volume in a coniferous plantation forest using Landsat TM. *International Journal of Remote Sensing* 18: 2209–2223.
- UMWELTBUNDESAMT** (2007): Umweltdaten Deutschland Online - Entwicklung der Struktur der Flächennutzung. <http://www.umweltbundesamt-umwelt-deutschland.de/umweltdaten/> (10.10.2009).
- F. VAN DER MEER & S.M. DE JONG** (2001): *Imaging Spectroscopy. Basic Principles and Prospective Applications*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London.
- D. VAN DER ZANDE, S. MEREU, N. NADEZHINA, J. CERMAK, B. MUYS, P. COPPIN & F. MANES** (2009): 3D upscaling of transpiration from leaf to tree using ground-based LiDAR: Application on a Mediterranean Holm oak (*Quercus ilex* L.) tree. *Agricultural and Forest Meteorology* 149 (10): 1573–1583.
- A. VAN LAAR & A. AKÇA** (2007): *Forest Mensuration*. Springer, Dordrecht, NL.
- G. VANE & A.F. GOETZ** (1988): Terrestrial Imaging Spectroscopy. *Remote Sensing of Environment* 24: 1–29.

- A. VERGER, F. CAMACHO, F.J. GARCÍA-HARO & J. MELIÁ** (2009): Prototyping of Land-SAF leaf area index algorithm with VEGETATION and MODIS data over Europe. *Remote Sensing of Environment* 113: 2285–2297.
- W. VERHOEF** (1984): Light Scattering by Leaf Layers with Application to Canopy Reflectance Modeling: The SAIL Model. *Remote Sensing of Environment* 16: 125–141.
- W. VERHOEF** (1985): Earth Observation Modeling Based on Layer Scattering Matrices. *Remote Sensing of Environment* 17: 165–178.
- W. VERHOEF, L. KIA, Q. XIAO & Z. SU** (2007): Unified Optical-Thermal Four-Stream Radiative Transfer theory for Homogeneous Vegetation Canopies. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing* 45 (6): 1808–1822.
- E.F. VERMOTE, D. TANRÉ, J.L. DEUZE, M. HERMAN & J.-J. MORCETTE** (1997): Second Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum, 6S: an overview. *IEEE Transactions of Geoscience and Remote Sensing* 35 (3), 675–686.
- M. VOHLAND** (1997): Einsatz von Satellitenbilddaten (Landsat TM) zur Ableitung forstlicher Bestandsparameter und Waldschadensindikatoren. Diplomarbeit, Universität Trier.
- M. VOHLAND, J. STOFFELS, C. HAU & G. SCHÜLER** (2007): Remote Sensing Techniques for Forest Parameter Assessment: Multispectral Classification and Linear Spectral Mixture Analysis. *Silva Fennica*, 41(3), 441–456.
- W. WAGNER, A. ULLRICH & C. BRIESE** (2003): Der Laserstrahl und seine Interaktion mit der Erdoberfläche. *Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation* 91: 223–235.
- W. WAGNER, A. ULLRICH, V. DUCIC, T. MELZER & N. STUDNICKA** (2006): Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitising airborne laser scanner. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 60: 100–112.
- W. WAGNER, M. HOLLAUS, C. BRIESE & V. DUCIC** (2008): 3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners. *International Journal of Remote Sensing* 29 (5): 1433–1452.
- S.J. WALSH** (1980): Coniferous Tree Species Mapping Using LANDSAT Data. *Remote Sensing of Environment* 9: 11–26.
- R. WEBSTER & M.A. OLIVER** (2007): *Geostatistics for Environmental Scientists*. Second Edition. John Wiley & Sons, Chichester, UK.
- A. WEHR & U. LOHR** (1999): Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 68–82.
- M. WEISS, B. BARET, G.J. SMITH, I. JONCKHEERE & P. COPPIN** (2004): Review of methods for in situ leaf area index (LAI) determination, Part II. Estimation of LAI, errors and sampling. *Agricultural and Forest Meteorology* 121: 37–53.
- J.M. WELLES & J.M. NORMAN** (1991): Instrument for Indirect Measurement of Canopy Architecture. *Agronomy Journal* 83: 818–825.
- M.A. WHITE, P.E. THORNTON, S.W. RUNNING & R.R. NEMANI** (2000): Parameterization and Sensitivity Analysis of the BIOME-BGC Terrestrial Ecosystem Model: Net Primary Production Controls. *Earth Interactions* 4-003: 1–85.

- J.-L. WIDLÓWSKI, M. ROBUSTELLI, M. DISNEY, J.-P. GASTELLU-ETCHEGORRY, T. LAVERGNE, P. LEWIS, P.R.J. NORTH, B. PINTY, R. THOMPSON & M.M. VERSTRAETE** (2008): The RAMI On-line Model Checker (ROMC): A web-based benchmarking facility for canopy reflectance models. *Remote Sensing of Environment* 112: 1144–1150.
- M. WULDER, K.O. NIEMANN & D.G. GOODENOUGH** (2000): Local Maximum Filtering for the Extraction of Tree Locations and Basal Area from High Spatial Resolution Imagery. *Remote Sensing of Environment* 73: 103–114.
- M. WULDER, T. HAN, J.C. WHITE, T. SWEDA & H. TSUZUKI** (2007): Integrating profiling LIDAR with Landsat data for regional boreal forest canopy attribute estimation and change characterization. *Remote Sensing of Environment* 110: 123–137.
- X. YU, J. HYYPPÄ, H. KAARTINEN & M. MALTAMO** (2004): Automatic detection of harvested trees and determination of forest growth using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 90: 451–462.
- P.J. ZARCO-TEJADA, J.R. MILLER, A. MORALES, A. BERJÓN & J. AGÜERA** (2004): Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. *Remote Sensing of Environment* 90: 463–476.
- Y. ZHANG, J.M. CHEN, J.R. MILLER & T.L. NOLAND** (2008): Leaf chlorophyll content retrieval from airborne hyperspectral remote sensing imagery. *Remote Sensing of Environment* 112: 3234–3247.
- H.J. ZWALLY, B. SCHUT, W. ABDALATI, J. ABSHIRE, C. BENTLEY, A. BRENNER, J. BUFTON, J. DEZIO, D. HANCOCK, D. HARDING, T. HERRING, B. MINSTER, K. QUINN, S. PALM, J. SPINHIRNE & R. THOMAS** (2002): ICESat's laser measurements of polar ice, atmosphere, ocean, and land. *Journal of Geodynamics* 34: 405–445.

# ANHÄNGE

## Anhang A Geländemessungen

Bestandsnr.	Baumart	Alter (FoGIS)	Anzahl [30×30m <sup>2</sup> ]	Vis. Kronenschluß [%]	BHU [cm]	Höhe [m]	Stammhöhe [m]	Kronenlänge [m]	Kronendurchm. [m]	LAI
108b	Buche	119	21	75	110	24.8	9.8	15.0	9.47	3.6
106a	Buche	73	42	50	81.7	24.8	11.2	13.6	5.76	2.4
105b	Buche	98	80	80	90.5	24.8	13.8	11.0	6.86	4.05
97a	Buche	73	52	45	76.5	24.6	12.4	12.2	5.94	2.3
96a	Buche	73	62	70	79	22	10.8	11.2	7.44	3.6
156b	Buche	10	532	95	29	7	4.0	3.0	2.92	5
163b	Buche	151	11	70	211.5	34.5	10.7	23.8	13.32	3.47
171b	Buche	42	69	75	68.7	16.8	7.7	9.1	6.28	4.54
173a1	Buche	29	272	85	43.8	13.2	6.1	7.1	3.40	5.7
173a2	Buche	68	67	80	82.8	22.9	13.3	9.6	8.36	4.9
138b	Buche	238	12	45	170.7	22.8	11.0	11.8	11.37	2.7
104b	Buche	65	47	45	72.3	22.8	7.8	15.0	4.81	2.6
92b	Buche	111	21	35	111.1	25.2	13.0	12.2	7.99	2.15
71a	Fichte	20	130	75	63.1	16	10.1	5.9	3.32	6
59b	Fichte	53	75	45	80.1	22.7	14.0	8.7	4.20	3.6
69b	Fichte	47	60	40	83.2	21.4	13.4	8.0	3.84	3.1
132a	Fichte	58	50	50	119.1	30.8	18.2	12.6	5.43	4.1
116b	Fichte	52	50	35	101.7	24.6	12.8	11.8	4.46	2.7
116a	Fichte	k.A.	180	65	35.8	10.1	2.0	8.1	2.66	4.2
158a2	Fichte	31	62	70	88.7	15.2	7.0	8.2	4.27	4.2
150b	Fichte	119	52	40	129.7	32.4	23.7	8.7	5.52	4
156a	Fichte	10	450	80	21	7.9	2.0	5.9	1.82	5.8
155a	Fichte	20	144	75	51.4	11.8	4.0	7.8	3.77	5.6
147a	Fichte	58	66	65	94.3	22.2	9.4	12.8	5.48	3.7
143a	Fichte	75	36	55	109.7	25.4	9.6	15.8	6.64	3.6
145	Fichte	104	29	45	141.2	32	16.8	15.2	6.21	3.2
142a	Fichte	110	29	40	159.9	31.8	18.2	13.6	6.38	3.4
55a2	Fichte	120	19	35	150.8	35.4	21.6	13.8	6.81	2.7

# Anhang B

## Radiometrische Korrektur der HyMap-Daten

Während im Labor kann die spektrale Reflexion von Objekten problemlos direkt gemessen werden kann, werden fernerkundliche Messungen der Strahlung durch die zwischen Strahlungsquelle und Objekt sowie die zwischen Objekt und Sensor liegende Atmosphäre beeinträchtigt. Um vergleichbare und quantitativ auswertbare Messwerte zu erhalten, müssen die Daten in Reflexionsgrade umgerechnet und von Atmosphäreneinflüssen befreit werden.

### B.1 Optische Dicke der Atmosphäre

Die Transmissivität der Atmosphäre  $t$  ist das Verhältnis der am Boden gemessenen Einstrahlung  $E$  und der außeratmosphärischen Einstrahlung  $E_0$ :

$$t = \frac{E}{E_0}. \quad (\text{B-1})$$

Da dieser Wert vom Weg der Strahlung durch die Atmosphäre, und damit vom Sonnenstand, abhängt, bietet es sich an, die Transmissivität durch einen vom Weg unabhängigen Parameter zu beschreiben. Nach dem Gesetz von Bouguer-Lambert-Beer ist die Änderung der Intensität eines Lichtstrahls an der Position  $x$  bei Durchgang durch ein trübes Medium proportional zum Produkt der Weglänge  $dx$  und des Extinktionskoeffizienten  $\tau$  (ROBINSON 1966):

$$dE = -\tau \cdot E(x) dx. \quad (\text{B-2})$$

Durch Integration dieser Beziehung über die gesamte Weglänge  $m$  mit der Anfangsbedingung  $E(x=0)=E_0$  und der Annahme eines homogenen Mediums ergibt sich das Gesetz in der bekannteren Form einer Exponentialfunktion (KRAUS & SCHNEIDER 1988, HOLBEN et al. 1998):

$$E = E_0 \cdot e^{-\tau \cdot m}. \quad (\text{B-3})$$

Dabei ist  $m$  die Weglänge relativ zum senkrechten Pfad durch die Atmosphäre (Atmosphärische Masse). Üblicherweise wird die Weglänge unter Vernachlässigung der Erdkrümmung und der durch die geschichtete Atmosphäre bedingten Refraktion aus dem Sonnenzenitwinkel  $\theta$  als  $m = 1/\cos \theta$  berechnet (ROBINSON 1966). Der Extinktionskoeffizient  $\tau$  wird als optische Dicke der Atmosphäre bezeichnet (KRAUS & SCHNEIDER 1988).

Die gesamte optische Dicke setzt sich additiv aus den optischen Dicken der an der Extinktion beteiligten Atmosphärenkomponenten zusammen: Der Rayleigh-Optischen-Dicke  $\tau_R$ , der Aerosol-Optischen-Dicke  $\tau_A$  (beide stehen für Streuungsprozesse) und der Gas-Optischen-Dicke  $\tau_{gas}$ , die die Gas-Absorptionen beschreibt (IQBAL 1983):

$$\tau = \tau_R + \tau_A + \tau_{gas} \quad (\text{B-4})$$



Die Streuung an den Molekülen der Atmosphäre wird durch die Rayleigh-Optische-Dicke erfasst. Diese kann in Abhängigkeit von der Wellenlänge  $\lambda$  (in  $\mu\text{m}$ ) berechnet werden, wobei unterschiedliche Autoren leicht unterschiedliche Formeln angeben (IQBAL 1983, HILL & STURM 1991):

$$\tau_R(\lambda) = 0.008735 \cdot \lambda^{-4.08} \quad (\text{B-5})$$

Gase absorbieren Strahlung in spezifischen Wellenlängenbereichen, den Absorptionsbanden. So wird beispielsweise die kurzwellige Einstrahlung unter  $0.29 \mu\text{m}$  durch Ozon vollständig absorbiert (SCHOTT 1997). Da außer dem Wasserdampf die atmosphärischen Gase räumlich und zeitlich fast konstant sind, kann die Gas-Optische-Dicke für Wellenlängen außerhalb der Wasserdampfabsorptionsbanden Tabellen entnommen werden.

Die Aerosol-Optische-Dicke kann, wenn die gesamte optische Dicke gemessen wurde, aus Gleichung (B-3) berechnet werden. Auch hier gibt es eine Wellenlängenabhängigkeit. Wenn Messwerte für einige Wellenlängen vorliegen, können die Ångström-Koeffizienten  $b$  und  $\nu$  für die Gleichung  $\tau_A = b \cdot \lambda^{-\nu}$  analytisch oder durch Regression bestimmt werden. Dabei ist  $b$  proportional zur Aerosolkonzentration in der Atmosphäre. Der Exponent  $\nu$  ist umgekehrt proportional zur mittleren Größe der Aerosole (IQBAL 1983, CRACKNELL & HAYES 1991).

## B.2 Atmosphärenkorrektur

Von der von einer Fläche in den Halbraum abgegebenen spezifischen Ausstrahlung  $M$  [ $\text{W m}^{-2}$ ] kann ein Teil in einem kleinen Raumwinkel einen Fernerkundungssensor erreichen. Dieser wird als Strahldichte [ $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1}$ ] bezeichnet (KRAUS & SCHNEIDER 1988). Der Sensor zeichnet diese als einheitenlose *Digital Numbers* ( $DN$ ) auf, wobei in jedem Kanal nur ein schmaler Ausschnitt der Wellenlängen registriert wird. Üblicherweise reagieren Sensoren annähernd linear auf einkommende Strahlung, so dass die Kalibrierung eines Sensors über Gleichungen der Form  $L_\lambda = a_0 + a_1 \cdot DN_\lambda$  erfolgt (HILL & STURM 1991). Im Folgenden wird aus Gründen der Übersichtlichkeit auf eine Darstellung der Wellenlängenabhängigkeit verzichtet.

Die vom Sensor registrierte reflektierte Strahldichte  $L$  kann bei Kenntnis der Einstrahlung  $E_0$  und des Sonnenzenitwinkels  $\theta$  unter Annahme einer lambertschen Streuung in die Reflexion am Sensor (*at-satellite reflectance*)  $\rho^*$  umgerechnet werden (HILL & MEHL 2003):

$$\rho^* = \frac{\pi L}{E_0 \cos \theta} \quad (\text{B-6})$$

Bei bekannten Kalibrierkonstanten des Sensors kann aus den aufgezeichneten  $DN$ s die spektrale Strahldichte mit einer physikalischen Einheit wie [ $\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ ] berechnet werden. Die spektrale Sonneneinstrahlung muss entsprechend in [ $\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$ ] vorliegen.

Nach der Formulierung des Strahlungstransfers im Modell 5S (*Simulation of the Satellite Signal in the Solar Spectrum*, TANRÉ et al. 1990) wird die Beziehung zwischen  $\rho^*$  und der eigentlichen Objektreflexion  $\rho_t$  (in der Gleichung fett gedruckt) wie folgt ausgedrückt:

$$\rho^* = T_{gas}^{\uparrow\downarrow} \cdot \left\{ \rho_{at} + \frac{T^\downarrow \cdot [t_d^\uparrow \cdot \rho_t + t_s^\uparrow \cdot \langle \rho \rangle]}{1 - \langle \rho \rangle \cdot s} \right\} \quad (\text{B-7})$$

Dabei ist  $T_{gas}^{\uparrow\downarrow}$  die gesamte absorptionsbedingte Gastransmission,  $T^\downarrow$  die abwärts gerichtete, streuungsbedingte atmosphärische Gesamttransmission (direkt und diffus),  $t_d^\uparrow$  die aufwärts gerichtete, streuungsbedingte direkte atmosphärische Transmission und  $t_s^\uparrow$  die aufwärts gerichtete, streuungsbedingte diffuse atmosphärische Transmission. Diese Transmissionskoeffizienten können aus Messungen der optischen Dicke  $\tau$  oder unter bestimmten Bedingungen auch aus einer Analyse der Fernerkundungsdaten selbst abgeleitet werden.  $s$  ist in der Gleichung die sphärische Albedo der Atmosphäre,  $\langle \rho \rangle$  der diffus in den Beobachtungspfad hineingestreuete Reflexionsanteil der Umgebung (VERMOTE et al. 1997). Die Gleichung lässt sich nach  $\rho_t$  auflösen, so dass die bidirektionellen Reflexionseigenschaften eines Objekts aus den Strahldichtemessungen eines Fernerkundungssystems abgeleitet werden können (HILL & MEHL 2003).

### B.3 Durchführung der Atmosphärenkorrektur

Zeitgleich zum Überflug wurden mit einem ASD Fieldspec-II-Spektroradiometer Referenzmessungen des Reflexionsgrads von Zielen im Flugstreifen Idarwald und im Gebiet eines am gleichen Tag beflogenen Streifens bei Gerolstein vorgenommen (SCHLERF et al. 2010). Die Ziele deckten dabei eine große Spanne von Objekten unterschiedlicher Reflektivität ab, beispielsweise Wasser, Asphalt, langes und kurzes Gras, Getreide und kalkhaltiges Material aus einem Bergbau. Die optische Dicke wurde abgeleitet aus Schätzungen der horizontalen Sichtweite durch drei meteorologische Stationen in der Umgebung. Der mittlere Wert der horizontalen Sichtweite betrug 35 km. Für die Referenzmessungen wurden die Strahldichten am Sensor mit Hilfe von iterativen Schätzungen des Wasserdampfgehalts aus mehreren Läufen des atmosphärischen Strahlungstransfermodells MODTRAN (BERK et al. 1998) bestimmt. Aus den modellierten Strahldichten und den vom Sensor gemessenen *Digital Numbers* wurden für jeden Kanal durch lineare Regression aktualisierte Kalibrierkonstanten bestimmt. Diese angepassten Konstanten lagen, abgesehen von einzelnen verrauschten Kanälen, im Bereich von  $\pm 10\%$  um die vom Betreiber des Sensors bestimmten Werte.

Mit Hilfe der aktualisierten Kalibrierkonstanten konnte eine räumlich differenzierte Wasserdampfkarte für den Flugstreifen erstellt werden (HILL & MEHL 2003). Die Wasserdampfkonzentration jedes Pixels wurde aus der Tiefe der Wasserabsorptionsbänder bei 0.94 und 1.14  $\mu\text{m}$  abgeleitet. Zusätzlich zur Korrektur der Atmosphäreneffekte wurde eine Korrektur der topographiebedingten Beleuchtungseffekte unter Berücksichtigung des Verhältnisses von direkter und diffuser Einstrahlung durchgeführt. Dazu wurden mit der parametrischen Geokorrektursoftware PARGE (SCHLÄPFER et al. 1998) aus einem Höhenmodell abgeleitete Pro-

dukte (Hangneigung, Exposition und sichtbarer Himmelsanteil je Pixel) in die Geometrie des unkorrigierten HyMap-Datensatzes überführt.

Vor der eigentlich Korrektur wurde eine Across-Track-Beleuchtungskorrektur durchgeführt, um Effekte auszugleichen, die bei Sensoren mit großem Blickfeld durch den wechselnden Beobachtungswinkel auftreten (SCHLERF et al. 2005).

Der aus der Korrektur Atmosphären- und Beleuchtungseffekte sowie der Rekalibrierung der Sensoren und der räumlich angepassten Schätzung des Wasserdampfgehalts der Atmosphäre resultierende Datensatz hat eine hohe radiometrische Qualität. Die Spektren stimmen in hohem Maße mit den Geländemessungen überein (vgl. Abbildung 2).

## Anhang C Programmcodes

### C.1 Programm zum Rastern der Lidar-Punktdaten

```

pro raster
; Sprache: IDL

for ii = 1,40 DO BEGIN

    path_1 = 'f:\bilddaten\laser\morbach\'
    path_in = 'rohdaten\'
    path_out= 'idlgrid\'
    path_2 = 'only\';'last\';'firs\'
    path_3 = 'morbach'
    path_4 = strtrim(string(ii),1);
    path_5 = '.asc'

    ; Template der ASCII-Datei einlesen
    RESTORE, 'f:\bilddaten\laser\morbach\plottemplate.dat'

    path_input = path_1 + path_in + path_2 + path_3 + path_4 + path_5
    result = read_ascii(path_input, TEMPLATE = PLOTTEMPLATE)

    TRIANGULATE, result.X, result.Y, TR

    xmx = ceil(max(result.x))
    xmn = floor(min(result.x))
    xrg = xmx-xmn

    ymx = ceil(max(result.y))
    ymn = floor(min(result.y))
    yrg = ymx-ymn

    raster = TRIGRID(result.X,result.Y,result.Z,TR, nx=xrg, ny=yrg)
    raster = rotate(raster,7)

    path_output = path_1 + path_out + path_2 + path_3 + path_4

    OPENW, lun, path_output, /get_lun
    writeu, lun, raster
    free_lun, lun

    ; Envi-Header
    OPENW, lun, path_output + '.hdr', /get_lun
    printf, lun, 'ENVI'
    printf, lun, 'description = { Von IDL-Programm erzeugt }'
    printf, lun, 'samples = '+ string(xrg)
    printf, lun, 'lines = ' + string(yrg)
    printf, lun, 'bands = 1'
    printf, lun, 'data type = 4'
    printf, lun, 'byte order = 0'
    printf, lun, 'map info = {Gauss-Kruger Zone 2, 1.5, 1.5,
        ' + string(xmn) + ', ' + string(ymx) + ', 1.0, 1.0, <none>, units=Meters} '
    printf, lun, 'projection info = {3, 6377397.2, 6356079.0, 0.0, 6.0,
        2500000.0, 0.0, 1.0, <none>, Gauss-Kruger Zone 2, units=Meters}'
    free_lun, lun
endfor

End

```

## C.2 Funktion zum Einlesen der Fullwave-Daten

```

function [m,fw]=read_fullwave_n(N,streifen);
%% Fullwave-Daten einlesen
% Sprache: Matlab
%
% Aufruf: [m,fw]=read_fullwave_n(N,streifen);
% m enthält die Metainformationen, fw die Fullwaves, jeweils Structures
% der Nte Punkt des genannten Flugstreifens wird ausgegeben

% Im .lgc-File liegen die Metadaten; 56 Byte Information pro Welle
% im .lwf-File liegen die eigentlichen Wellen

ordner = 'd:\Bilddaten\Laser\Morbach\Fullwave\';
file = ['050824_181312_' num2str(streifen,'%02d')];
ext1 = '.lgc'; % geocoding and indexing information
ext2 = '.lwf'; % Calibrated waveform data

fid1 = fopen([ordner file ext1]);
fid2 = fopen([ordner file ext2]);

% Zu gewünschtem Metadatensatz springen
fseek(fid1, (N-1)*56, 'bof');

% Die einzelnen Informationen in Struct m schreiben
m.WFI      = fread(fid1,1,'uint64'); % Offset
m.T        = fread(fid1,1,'double'); % Timestamp
m.E0       = fread(fid1,1,'double'); % Easting
m.N0       = fread(fid1,1,'double'); % Northing
m.H0       = fread(fid1,1,'float');  % Ellipsoidal Height
m.dE       = fread(fid1,1,'float');  % Easting Component
m.dN       = fread(fid1,1,'float');  % Northing Component
m.dH       = fread(fid1,1,'float');  % Elevation Component
m.WFOFFSET = fread(fid1,1,'uint16'); % Offset of first sample of WF
m.WFLEN    = fread(fid1,1,'uint16'); % N of samples in return waveform
m.STRTWFLEN= fread(fid1,1,'uint16'); % N of Samples in start waveform
m.SAMPDEPTH= fread(fid1,1,'uint8');  % 0: 1 Byte/Sample, 1: 2 Byte
m.RES      = fread(fid1,1,'uint8');  % reserved, always 0

if (m.SAMPDEPTH==0)
    m.WFtype='uint8';
elseif (m.SAMPDEPTH==1)
    m.WFtype='uint16';
end

% Zu Position im Waveform-Datensatz springen
fseek(fid2,m.WFI,'bof');

fw.S = fread(fid2, m.STRTWFLEN,'uint8'); % Einlesen der Startwelle
fw.E = fread(fid2, m.WFLEN, m.WFtype);  % Einlesen der Echo-Welle

% Koordinaten für jedes Bin
incr = 1 : m.WFLEN;
m.E = m.E0 + m.dE*(m.WFOFFSET+incr); % Easting am Boden
m.N = m.N0 + m.dN*(m.WFOFFSET+incr); % Northing am Boden
m.H = m.H0 + m.dH*(m.WFOFFSET+incr); % Höhe über NN am Boden

fclose (fid1);
fclose (fid2);

```

### C.3 Programm zum Rastern der Fullwave-Daten

```

function [output1, output2] = fullwave_hyperspec()
%% Fullwave-Hyperspec
% Sprache: Matlab
%
% Erzeugung eines 76-kanaligen Rasterbildes aus Fullwave-Daten.
% Berechnung der Summe der Energie pro Voxel (5 x 5 x 0.5 m³) [output1]
% und der Treffer pro Voxel [output2]

o.baender=76; % Max nennenswerte Höhe = 38m
o.zeilen=2106;
o.spalten=2368;

output1=zeros(o.zeilen, o.spalten, o.baender,'uint16');
output2=zeros(o.zeilen, o.spalten, o.baender,'uint16');
[ground,xgr,ygr]=...
envilesengeo('d:\Bilddaten\Laser\Morbach\morbach_ground_hoehe_5m');
ground=ground';

step=0.5;

for streifen=1:10

    % Anzahl Datensätze pro Flugstreifen:
    N_echos=[15721643; 15248878; 24207499; 20772375; 22883322;...
            17520430; 24562890; 17414457; 23453304; 17259157];

    for N = 1:N_echos(streifen)

        % m enthält die Metainformationen, fw die Fullwaves
        [m,fw]=read_fullwave_n(N,streifen);

        maxS = max(fw.S); % Maximum der ausgesandten Welle
        maxS = maxS(1); % falls es mehrere Werte geben sollte...

        R=m.WFOFFSET:m.WFOFFSET+m.WFLEN-1; % Distanzen zum Sensor
        fw.kI=(fw.E'.*R.^2)/4e4/maxS; % kalibrierte Welle,
        % /4e4 um im int16-Bereich zu bleiben

        % Passendes Pixel im Ground-Datensatz finden
        xmap=round((m.E(end)-2579837)/5);
        ymap=round((5527000-m.N(end))/5);

        % Ausreißerprüfung
        if (ymap > 0 & ymap <= o.spalten & xmap > 0 &...
            xmap <= o.zeilen & ground(xmap,ymap) > 430)

            % 50 cm Streifenhöhenausgleich
            if (streifen>3), m.H = m.H-0.50; end

            % Vektor der Voxelhöhen über NN
            dH=ground(xmap,ymap):step:m.H(1); %m.H(1): Höhe der Welle

            % Interpolation auf Voxelhöhen und NaNs löschen
            interpol_hoehen = interp1(m.H,fw.kI,dH);
            interpol_hoehen(isnan(interpol_hoehen)) =0 ;

            % Falls doch mal mehr als 38 m: Oben abschneiden
            if (length(interpol_hoehen) > o.baender)
                interpol_hoehen = interpol_hoehen(1:o.baender);
            end

            % Intensitätswerte in [1,1,76]-Vektor
            interpol_hoehen = ...
                reshape(interpol_hoehen,1,1,length(interpol_hoehen));

            % Intensitätswerte zu bisherigen dazuaddieren

```

```

        output1(xmap,ymap,1:length(interpol_hoehen)) = ...
            output1(xmap,ymap,1:length(interpol_hoehen)) + ...
            uint16(interpol_hoehen);

        % Zählen und addieren der betroffenen Voxel
        getroffenevoxel = find(interpol_hoehen ~= 0);
        output2(xmap,ymap,getroffenevoxel) = ...
            output2(xmap,ymap,getroffenevoxel)+1;
    end
end
end

% In Envi-lesbarem Format abspeichern
save fw_hs_1 output1 -v6
save fw_hs_2 output2 -v6

```

## C.4 Programm zur Extraktion von Punkten aus Fullwave-Daten

```

%% FW2DP
% Fullwave to Discrete Points
% Sprache: Matlab

N_echos=[15721643; 15248878; 24207499; 20772375; 22883322;...
        17520430; 24562890; 17414457; 23453304; 17259157];

path = 'D:\Bilddaten\Lasere\Morbach\fw2dp2\';

x_min=2578000; x_max=2591000;
y_min=5514600; y_max=5527000; % Morbach

kg=200; % Kachelgröße
xteil = 1; % Keine Unterteilung in x-Richtung
yteil = ceil((y_max-y_min)/kg); % Anzahl der Kacheln in y-Richtung

%% Dateien öffnen
for xx=1:xteil
    for yy=1:yteil

        xmin(xx)=(x_max-x_min)/xteil*(xx-1)+x_min;
        ymin(yy)=(y_max-y_min)/yteil*(yy-1)+y_min;

        % f_1: First Pulse
        % f_i: Intermediate Pulse
        % f_9: Last Pulse
        % f_0: Only Pulse
        f_1(xx,yy) = fopen([path 'fw2dp_1_' num2str(xmin(xx)) ...
            '_' num2str(ymin(yy)) '.txt'], 'at');
        f_i(xx,yy) = fopen([path 'fw2dp_i_' num2str(xmin(xx)) ...
            '_' num2str(ymin(yy)) '.txt'], 'at');
        f_9(xx,yy) = fopen([path 'fw2dp_9_' num2str(xmin(xx)) ...
            '_' num2str(ymin(yy)) '.txt'], 'at');
        f_0(xx,yy) = fopen([path 'fw2dp_0_' num2str(xmin(xx)) ...
            '_' num2str(ymin(yy)) '.txt'], 'at');
    end
end

for streifen = 1:10
    for N = 1:N_echos(streifen)
        [m,fw]=read_fullwave_n(N,streifen);
        peakpos = [];
        peakint = [];

        % Peaks in den Wellen finden
        for ii=2:length(fw.E)-1
            if fw.E(ii)>5 & fw.E(ii)>= fw.E(ii-1) & fw.E(ii)>=fw.E(ii+1)
                peakpos = [peakpos; ii];
            end
        end
    end
end

```

```
        end
    end

    peakE = m.E(peakpos);
    peakN = m.N(peakpos);
    peakH = m.H(peakpos);
    peakI = fw.E(peakpos); %% Höhe des Peaks
    peakNR = 1:length(peakpos);
    peakNR(end) = 9; % Last Pulse kriegt ne 9
    if length(peakpos) == 1
        peakNR = 0; % Only Pulse
    end

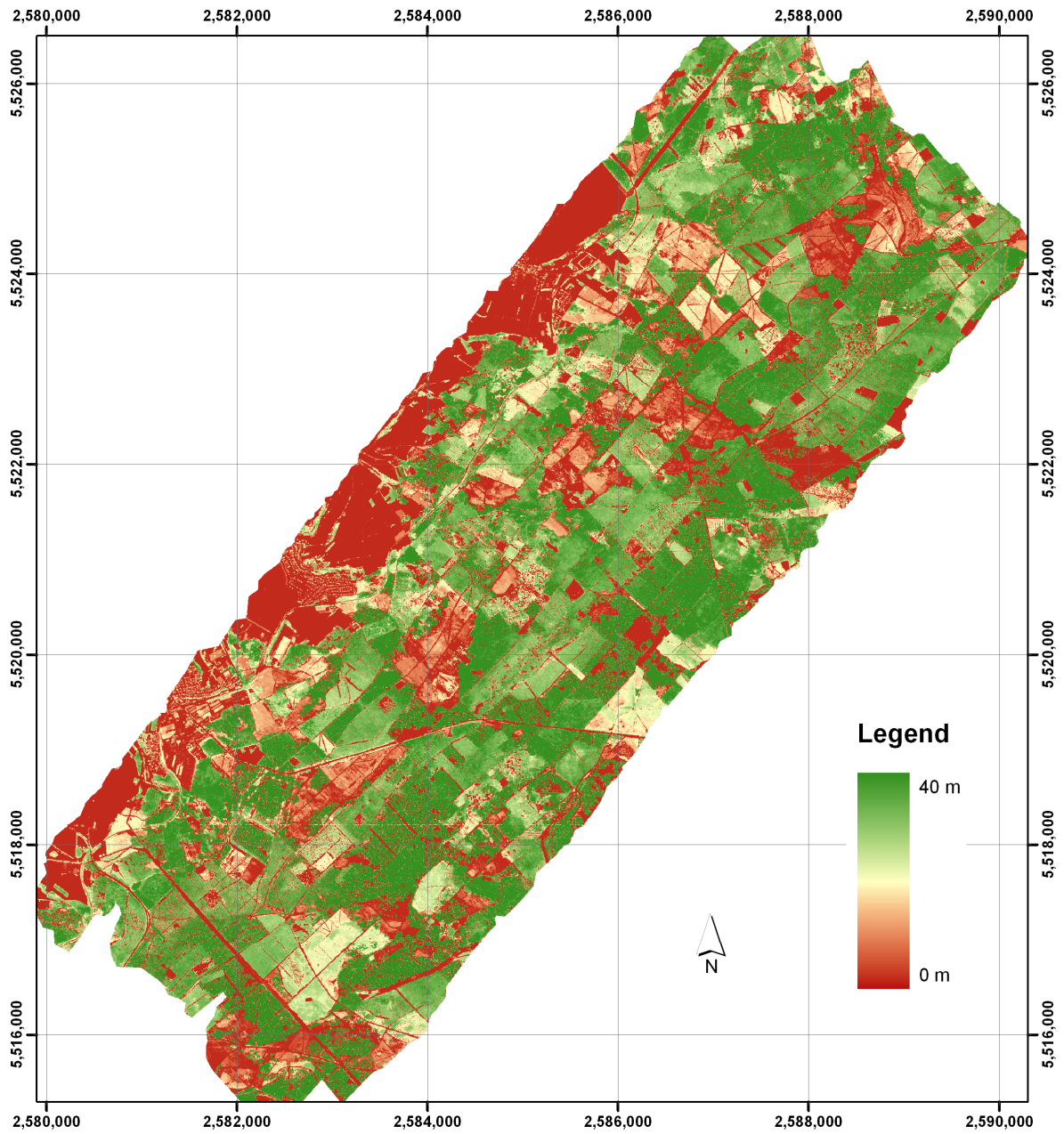
    winkel=acosd(-m.dH/sqrt(m.dH^2+m.dN^2+m.dE^2));

    %% Jeden Punkt als Zeile in der richtigen Datei speichern
    for ii = 1:length(peakpos)
        yy = floor((peakN(ii)-y_min)/kg)+1;
        switch peakNR(ii)
            case 0
                fid = f_0(yy);
            case 1
                fid = f_1(yy);
            case 9
                fid = f_9(yy);
            otherwise
                fid = f_i(yy);
        end
        fprintf(fid,'%12.4f %12.4f %9.4f %5.2f %5.2f %2d\n', ...
            peakE(ii), peakN(ii), peakH(ii), peakI(ii), winkel, streifen);
    end
end
end
fclose all;
```



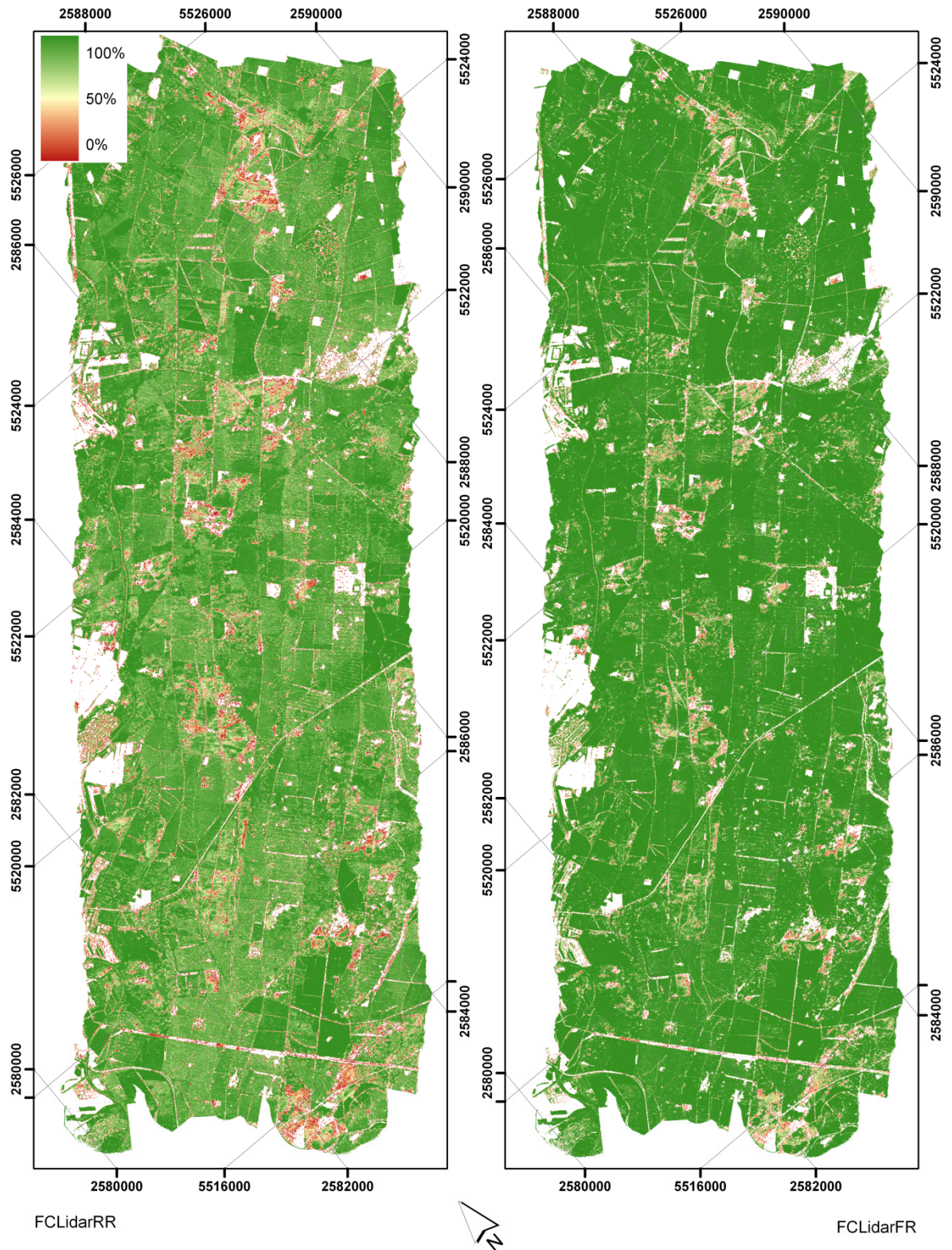
# Anhang D Karten

## D.1 Baumhöhen

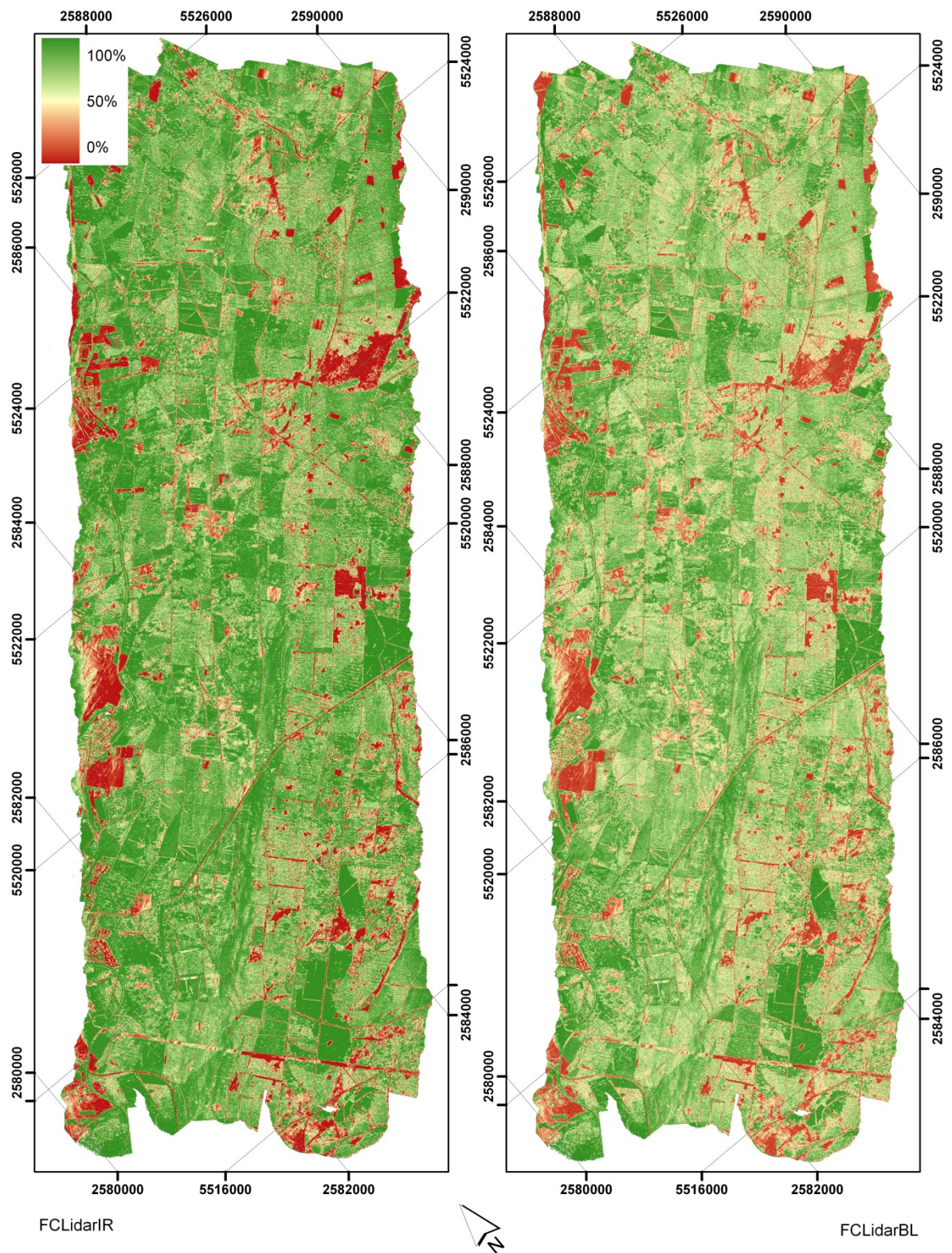




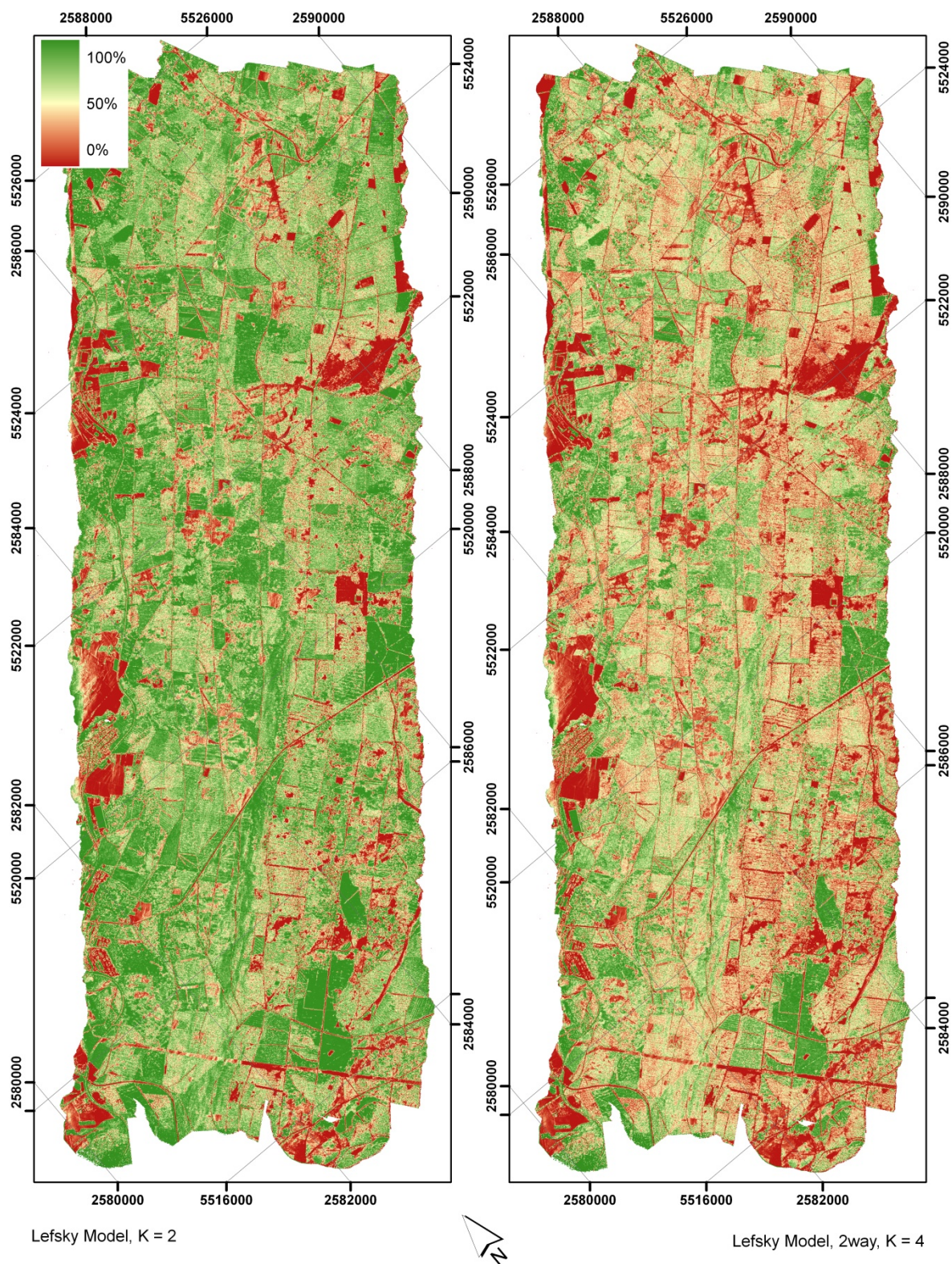
### D.3 Fractional Cover RR und FR



### D.4 Fractional Cover IR und BL



### D.5 Fractional Cover nach Lefsky-Modell



## Anhang E Konfusionsmatrizen

### E.1 Eingangsdaten: HyMap

Klasse	Ground Truth (%)						Prod. Acc.	User Acc.
	Fi alt	Fi bau	Fi sta	Fi dic	Dou sta	Dou dic	(%)	(%)
Unklass.	0	0	0	0	0	0	-	-
Fi alt	<b>64.05</b>	30.02	22.25	9.65	2.95	0.24	64.05	39.83
Fi bau	24.21	<b>42.60</b>	21.00	1.69	3.96	0.24	42.6	55.19
Fi sta	10.81	26.35	<b>50.75</b>	3.77	2.89	0.24	50.75	56.81
Fi dic	0.23	0.28	4.08	<b>80.18</b>	0.63	0.10	80.18	86.71
Dou sta	0.40	0.57	0.78	1.50	<b>68.01</b>	20.04	68.01	77.94
Dou dic	0.31	0.17	1.15	3.22	21.56	<b>79.15</b>	79.15	64.45
Gesamtklassifikationsgenauigkeit: 57.2%						Kappa-Koeffizient:		0.466

### E.2 Eingangsdaten: HyMap und Lidar-Perzentile

Klasse	Ground Truth (%)						Prod. Acc.	User Acc.
	Fi alt	Fi bau	Fi sta	Fi dic	Dou sta	Dou dic	(%)	(%)
Unklass.	0	0	0	0	0	0	-	-
Fi alt	<b>70.44</b>	14.95	4.56	6.89	0.57	0.19	70.44	64.64
Fi bau	24.40	<b>50.75</b>	26.59	1.72	5.49	0.29	50.75	55.75
Fi sta	4.15	33.38	<b>62.44</b>	4.50	3.39	0.29	62.44	59.38
Fi dic	0.13	0.10	4.29	<b>82.35</b>	0.41	0.00	82.35	87.39
Dou sta	0.71	0.58	0.92	0.89	<b>70.86</b>	14.63	70.86	81.63
Dou dic	0.17	0.24	1.20	3.65	19.28	<b>84.60</b>	84.6	67.34
Gesamtklassifikationsgenauigkeit: 65.7%						Kappa-Koeffizient:		0.554

### E.3 Eingangsdaten: HyMap und Lidar-Wellenformen

Klasse	Ground Truth (%)						Prod. Acc.	User Acc.
	Fi alt	Fi bau	Fi sta	Fi dic	Dou sta	Dou dic	(%)	(%)
Unklass.	0	0	0	0	0	0	-	-
Fi alt	<b>85.99</b>	14.52	5.01	3.46	1.33	0.29	85.99	70.00
Fi bau	9.82	<b>54.53</b>	21.17	0.34	5.93	0.62	54.53	66.96
Fi sta	0.75	29.12	<b>65.16</b>	3.86	3.27	0.19	65.16	64.71
Fi dic	0.31	0.23	3.58	<b>88.02</b>	0.03	0.05	88.02	89.47
Dou sta	3.04	1.07	0.51	0.12	<b>81.52</b>	16.07	81.52	80.04
Dou dic	0.10	0.54	4.57	4.20	7.93	<b>82.78</b>	82.78	67.75
Gesamtklassifikationsgenauigkeit: 70.7%						Kappa-Koeffizient:		0.632

## E.4 Eingangsdaten: Lidar-Wellenformen

Klasse	Ground Truth (%)						Prod. Acc.	User Acc.
	Fi alt	Fi bau	Fi sta	Fi dic	Dou sta	Dou dic	(%)	(%)
Unklass.	0	0	0	0	0	0	-	-
Fi alt	<b>65.14</b>	6.43	1.08	0.03	11.19	1.05	65.14	76.22
Fi bau	13.45	<b>41.46</b>	13.52	0.25	27.14	15.97	41.46	55.91
Fi sta	1.86	41.70	<b>63.37</b>	5.76	23.43	17.89	63.37	50.17
Fi dic	4.96	0.41	3.47	<b>90.50</b>	0.06	0.91	90.5	82.93
Dou sta	14.47	6.45	2.08	0.06	<b>30.22</b>	9.09	30.22	35.65
Dou dic	0.13	3.55	16.49	3.40	7.96	<b>55.09</b>	55.09	35.68
Gesamtklassifikationsgenauigkeit: 56.1%					Kappa-Koeffizient:		0.448	

# Anhang F In- und Output des Modells FRT

## F.1 Die Inputdatei

```

'Idarwald Buche'           : [01] data set name
65                         : [02] stand age
1                           : [03] # size classes
*** files of refractive index and other tree classes:
'refrind.dat'             : [04]
x0 xmin xmax dx i        : [05]
'Buche'                   : [06] species
t                          : [07] crown form
.06 .01 .10 .002         : [08] stand density, m^-2
20                         : [09] tree height, m
10                         : [10] crown l,m ell V con
0.                         : [11] cylinder
2.5                        : [12] crown radius, m
22.                        : [13] trunk diameter, cm
6.                         : [14] total dry leaf weight, kg/tree
90.                        : [15] SLW - leaf weight/area, gm^-2
.1                          : [16] BAI/LAI
1.5                        : [17] tree distr. parameter
.8                          : [18] shoot shading coef
'prospect'                : [19] leaf optics model
3                           : [20] # of leaf components
0.25 0 0 0 'chlorop3.dat' : [21] c1, % of SLW, model comp. 1
250. 0 0 0 'waterp3.dat'  : [22] c2, % of SLW, model comp. 2
99.0 0 0 0 'drymatter.dat': [23] c3, % of SLW, model comp. 3
.015                       : [24] leaf str. param. - coefficient
.9                          : [25] refraction index ratio
.1                          : [26] shoot length, m
'sprutr1.dat'             : [27] file of branch reflectance
'birchtr.dat'             : [27] file of trunk reflectance
1                           : [28] crown layer number nz
*** Ground vegetation ***
.1                          : [29] LAI2_ground, upper layer
.15                         : [30] sl2_ground
1.                          : [31] sz2- the Markov parameter
0.                          : [32] eln2 - -ln(1 -eps)
90.                         : [33] thm2 - modal leaf angle
.9                          : [34] n_ratio2
160.                       : [35] SLW2(g/m^2)
'prospect'                 : leaf optics model, upper layer
4                           : # of leaf components
.4 0 0 0 'chlorop3.dat'    : c1, % of SLW, model comp. 1
150. 0 0 0 'waterp3.dat'   : c2, % of SLW, model comp. 2
99.6 0 0 0 'drymatter.dat' : c3, % of SLW, model comp. 3
.2 0 0 0 'brownpigm.dat'   : c4, % of SLW, model comp. 4
.01                         : N2 (PROSPECT) - coefficient
.1                          : [36] LAI1_ground, lower layer
.15                         : sl1_ground
1.                          : sz1 - the Markov parameter
0.                          : eln1 - -ln(1 - eps)
90.                         : thm1 - modal leaf angle
.9                          : n_ratio1
160.                       : SLW1(g/m^2)
'prospect'                 : leaf optics model, lower layer
4                           : # of leaf components
.4 0 0 0 'chlorop3.dat'    : c1, % of SLW, model comp. 1
150. 0 0 0 'waterp3.dat'   : c2, % of SLW, model comp. 2
99.6 0 0 0 'drymatter.dat' : c3, % of SLW, model comp. 3
.2 0 0 0 'brownpigm.dat'   : c4, % of SLW, model comp. 4
.0112                      : N1 (PROSPECT) - coefficient

```



```

'price.dat' 45.           : [37] file of Price' vectors, th*
.217 0 0 0              : s1 - soil parameters
-.05 0 0 0              : s2
.0 0 0 0                : s3
.0 0 0 0                : s4
2 .70 .29 .0 .01        : [38] iaer, c(n) - aerosol data (6S)
30. .06                 : [39] v, tau_aer(550) - visibility (6S)
1                       : [40] *ijob*
1 110 -5                : [41] # Sun angles, spec. ch.; spec. step
45.                     : [42] Sun zeniths
450 462.4 478.1 493 [...] : [43] Spectral Channels
0. 2. 0.                : [44] view nadir angle, its increment, and view azi-
muth angle

```

Die Zeilen bestehen jeweils aus einem oder mehreren Werten und einer Erklärung. Die wichtigsten Zeilen sind nummeriert; ihre Funktion wird im Folgenden kurz beschrieben:

1. Name des Datensatzes (ohne Funktion).
2. Alter des Bestands (ohne Funktion).
3. Anzahl der Größenklassen. Bis zu zehn Baumklassen können vermischt werden. Wenn mehrere Klassen verwendet werden sollen, kann deren Parameterdatei in der übernächsten Zeile angegeben werden.
4. Nach einer Kommentarzeile folgen eine Datei mit den Refraktionsindizes pro Wellenlänge (siehe folgenden Abschnitt) und eventuell weitere Inputdateien bei mehreren Baumklassen.
5. Eine Kommentarzeile, die die Besetzung der folgenden Spalten für den Fall angibt, dass das Modell invertiert werden soll. Dann steht in der ersten Spalte jeweils der Startwert, in den folgenden Minimum und Maximum sowie ein Toleranzwert. Bei der Vorwärtsmodellierung wird nur die erste Spalte benötigt.
6. Die Baumart dient nur informativen Zwecken.
7. Die Kronenform kann den Wert 't' für Ellipse oder 'f' für Kegel annehmen.
8. Bestandsdichte in Bäumen pro  $m^2$ . Hier sind Minimum, Maximum und Toleranz für die Invertierung angegeben, bei den folgenden Zeilen jeweils nur die minimal notwendige Anzahl Spalten für die Vorwärtsmodellierung.
9. Baumhöhe in m.
10. Kronenlänge: Länge der Ellipse oder des konischen Teils.
11. Länge des zylindrischen Teils der Krone (nur bei konisch/zylindrischen Kronen)
12. Kronenradius in m.
13. Stammdurchmesser in cm.
14. Gesamte trockene Blattmasse in kg pro Baum.
15. SLW: Blattgewicht pro Fläche in  $g/m^2$ .
16. BAI/LAI ist das Verhältnis der Rindenfläche zur Blattfläche (*Branch Area Index / Leaf Area Index*).

17. Beim Baumverteilungsindex entspricht ein Wert von 1 einem zufällig angeordneten Bestand, ein Wert größer 1 einem regelmäßigen Bestand und ein Wert kleiner 1 einem geklumpten Bestand.
18. Der Trieb-Beschattungsparameter trägt der Abnahme des effektiven LAI durch gegenseitige Beschattung der Blätter oder Nadeln Rechnung. Ein Wert von 1 entspricht dabei fehlender Beschattung. Dieser Parameter charakterisiert die kleinräumige Klumpung, während der vorherige die großräumige Klumpung beschreibt (LACAZE & ROUJEAN 2001).
19. Als Blattreflexionsmodell stehen PROSPECT und LIBERTY zur Verfügung.
20. Diese Zeile gibt an, wie viele Blattkomponenten im Blattreflexionsmodell berücksichtigt werden. Ihr Gewichtsanteil wird in den nächsten Zeilen angegeben.
21. Chlorophyllgehalt in Prozent des Blatt-Trockengewichts SLW. In der fünften Spalte wird eine Datei mit Absorptionskoeffizienten angegeben.
22. Wassergehalt in % des SLW (üblicherweise über 100%).
23. Gehalt an Trockenmasse in % des SLW.
24. Umgewandelter PROSPECT-Strukturparameter  $N$ . Bei FRT wird der Parameter  $c_n = N/SLW$  verwendet.
25. Mit diesem Faktor kann der Refraktionsindex der Blattoberfläche (siehe Abbildung 58 links unten) angepasst werden. Die Refraktionswerte stehen in der in Zeile 4 angegebenen Datei.
26. Länge der Triebe in m.
27. Dateien der Ast- und Stammreflexion.
28. Anzahl der Kronenschichten.
29. Nach einer Kommentarzeile beginnen die Parameter des zweischichtigen Reflexionsmodells MCRM2 für die Vegetation unter der Baumschicht (KUUSK 2001) mit dem Blattflächenindex.
30. Die relative lineare Größe der Blätter.  $s_L = l_L/H$ , wobei  $H$  die Bestandshöhe ist und  $l_L$  von der Größe, Form und Ausrichtung der Blätter abhängt (NILSON & KUUSK 1989, KUUSK 1995b).
31. Markov-Parameter des Modells MCRM2
32. Exzentrizität der elliptischen Verteilung der Blätter
33. Modalwert der Blatthaltungswinkel. Die Verteilung der Blatthaltungswinkel in Abhängigkeit der beiden Parameter wird in NILSON & KUUSK (1989) und KUUSK (1995b) beschrieben.
34. Das Verhältnis der Refraktionsindizes des Blattoberflächenwachses und des Blattinern (KUUSK 1994).
35. Die folgenden Zeilen beinhalten, analog zu den Werten in den Zeilen 15 und 19 bis 24 das Blatttrockengewicht, das verwendete Blattreflexionsmodell, die Blattbestandteile mit den Dateinamen ihrer Absorptionsspektren und den PROSPECT-Strukturparameter nach der Umrechnung wie in Zeile 24.

36. In den nächsten Zeilen werden für die untere der beiden Bodenvegetationsschichten die gleichen Informationen angegeben wie in den Punkten 29 bis 35.
37. Dateiname der Price-Vektoren und Sonnenzenitwinkel für die Bodenreflexion. Die vier folgenden Zeilen beinhalten die Gewichte der vier Price-Vektoren.
38. Hier kann ein Aerosolmodelltyp angegeben werden. Dabei bedeutet die Ziffer in der ersten Spalte:
  - 1: Modellierung der BRDF (*Bidirectional Reflectance Distribution Function*), es wird nur die direkte Einstrahlung und nicht das Himmelslicht modelliert
  - 0: Keine Aerosole
  - 1: Kontinentales Modell
  - 2: Maritimes Modell
  - 3: Urbanes Modell
  - 4: Eigene Werte für die Volumenanteile der folgenden Aerosoltypen werden in den folgenden vier Spalten angegeben: Staubartig, wasserlöslich, ozeanisch und Ruß.
39. Die horizontale Sichtweite und die Aerosol-optische Dicke bei 550 nm. Wird als horizontale Sichtweite eine negative Zahl angegeben, wird die Trübung der Atmosphäre aus der optischen Dicke berechnet.
40. Diese Zeile steuert, was das Modell berechnet. Die möglichen Werte sind
  - 0: Ein einzelner Reflexionswert wird berechnet
  - 1: Ein Reflexionsspektrum für die im Folgenden gegebenen Sonnen- und Blickwinkel wird modelliert
  - 2: Berechnung der Winkelverteilung der Reflexion bei gegebenem Azimutwinkel
  - 3: Berechnung der Reflexion für mehrere Sonnenzenitwinkel
  - 4 und 5: Inversion des Modells (siehe Abschnitt 5.5)
41. Anzahl der zu modellierenden Sonnenzenitwinkel und der Spektralkanäle. Der Parameter in der dritten Spalte gibt entweder die Schrittweite zwischen den Spektralkanälen in nm an (positive Zahl), oder legt fest dass jede einzelne Wellenlänge angegeben wird (negative Zahl).
42. Die zu verwendenden Sonnenzenitwinkel.
43. Die Spektralkanäle (in nm). Ist oben eine positive Zahl angegeben, wird nur der erste Wert verwendet. Im Beispiel sind nur die ersten vier Kanäle von HyMap angegeben, bei den Modelldurchläufen wurden alle HyMap-Kanäle im Wertebereich des Modells verwendet.
44. In der ersten Spalte steht der erste Blick-Nadirwinkel. Weitere Nadirwinkel ergeben sich aus der Schrittweite in der zweiten Spalte und der Anzahl der Winkel in Zeile 41. Die dritte Spalte enthält den Azimutwinkel, gemessen von der *Principal Plane* (Abbildung 56) aus.

## F.2 Output des Bestandsreflexionsmodells FRT

```

#
# Forest Reflectance Model V.09.2002 by T. Nilson & A. Kuusk
#
#
# Input parameters:
# Stand Age = 65      Sensitivitaet 2008
# Sun angles = 45.0
## ijob = 1
# 110 channel(s)
# Delta view zenith = 2.0   view azimuth = 0.0
#
#      Baum
#      ellips
# stand density, m-2 0.0600
# tree height, m    20.000
# ellipsoid or cone 10.000
# cylinder, m       0.000
# crown radius, m   2.500
# trunk diameter, cm 22.000
# total leaf weight 6.000
# leaf weight, g m-2 90.000
# BAI/LAI           0.100
# tree distr. param. 1.500
# shoot shading par. 0.800
# Leaf models:      prospect
# # of leaf componen 3
#   chlorop3.dat
# c1, % of SLW      0.50
#   waterp3.dat
# c2, % of SLW      250.00
#   drymatter.dat
# c3, % of SLW      99.00
# leaf struct. par. 0.0150
# refr. ind. ratio  0.9000
# shoot size, m     0.1000
# bark refl. files: sprutr1.dat
# trunk refl. files birchtr.dat
# nz = 3
#
# *** Ground vegetation, upper layer
# ground LAI        0.60
# leaf size         0.15
# sz               1.00
# eln              0.00
# thm             90.00
# n_ratio          0.90
# SLW             160.00
# Leaf model:      prospect
# # of leaf components: 4
#   chlorop3.dat
# c1, % of SLW     0.40
#   waterp3.dat
# c2, % of SLW     150.00
#   drymatter.dat
# c3, % of SLW     99.60
#   brownpigm.dat
# c4, % of SLW     0.20
# leaf struct. par. 0.0112
# *** Ground vegetation, lower layer
# ground LAI        0.10
# leaf size         0.15
# sz               1.00
# eln              0.00
# thm             90.00
# n_ratio          0.90
# SLW             160.00
# Leaf model:      prospect

```

```

# # of leaf components:      4
# chlorop3.dat
# c1, % of SLW              0.40
# waterp3.dat
# c2, % of SLW             150.00
# drymatter.dat
# c3, % of SLW             99.60
# brownpigm.dat
# c4, % of SLW              0.20
# leaf struct. par.        0.0112
# s1_soil                  0.2170
# s2                       -0.0500
# s3                       0.0000
# s4                       0.0000
#
# 6S parameters
# aerosols type identity :  maritime aerosols model      *
# optical condition identity :                               *
# visibility -30.00 km opt. thick. 550nm 0.0000          *
# ground pressure [mb] 1013.00                             *
#
# *** Results:
# Sun angles =      45.0
#
#           1
#           Baum      totals
#           ellips
# stand density, m-2    0.060    0.060
# tree height, m       20.000   20.000
# ellipsoid or cone    10.000   10.000
# cylinder, m          0.000    0.000
# crown radius, m      2.500    2.500
# trunk diameter, cm   22.000   22.000
# total leaf weight     6.000    6.000
# leaf weight, g m-2   90.000   90.000
# BAI/LAI              0.100    0.400
# tree distr. param.   1.500    0.000
# shoot shading par.   0.800    0.000
# Leaf models: prospect
# # of leaf components      3
# chlorop3.dat
# c1, % of SLW              0.50
# waterp3.dat
# c2, % of SLW             250.00
# drymatter.dat
# c3, % of SLW             99.00
# leaf struct. par.        0.0150
# refr. ind. ratio         0.9000
# bark refl. files: sprutr1.dat
# trunk refl. files birchtr.dat
# nz = 3
# rl_eff = 0.0701  tl_eff = 0.0141  n_eff = 1.3459  rsl = 0.0264
# roo              0.229
# leaf area density 0.458
# Total LAI        4.000
# Total BAI        0.400
# crown closure = 1.178          canopy closure = 0.829
#
# *** Ground vegetation, upper layer
# ground LAI        0.60
# leaf size         0.15
# sz                1.00
# eln               0.00
# thm              90.00
# n_ratio           0.90
# SLW              160.00
# Leaf model: prospect
# # of leaf components:      4
# chlorop3.dat

```

```

# c1, % of SLW          0.40
#   waterp3.dat
# c2, % of SLW          150.00
#   drymatter.dat
# c3, % of SLW          99.60
#   brownpigm.dat
# c4, % of SLW          0.20
# leaf struct. par.    0.01
# *** Ground vegetation, lower layer
# ground LAI           0.10
# leaf size             0.15
# sz                    1.00
# eln                   0.00
# thm                   90.00
# n_ratio               0.90
# SLW                   160.00
# Leaf model:  prospect
# # of leaf components: 4
#   chlorop3.dat
# c1, % of SLW          0.40
#   waterp3.dat
# c2, % of SLW          150.00
#   drymatter.dat
# c3, % of SLW          99.60
#   brownpigm.dat
# c4, % of SLW          0.20
# leaf struct. par.    0.0112
# s1_soil               0.2170
# s2                    -0.0500
# s3                    0.0000
# s4                    0.0000
#
# wl, nm      bq_up      b_down      r_ground      S'/Q
#
  450.0      0.17719E-01  0.16261      0.19350E-01  0.88959
  462.4      0.18212E-01  0.17129      0.21976E-01  0.90049
  478.1      0.18943E-01  0.18204      0.25666E-01  0.91025
  493.4      0.20863E-01  0.20037      0.29812E-01  0.91854
  508.5      0.34016E-01  0.12633      0.29978E-01  0.0000
  524.1      0.49891E-01  0.43062      0.52012E-01  0.93735
  539.4      0.56283E-01  0.51942      0.59589E-01  0.94413
  554.9      0.59965E-01  0.60008      0.65992E-01  0.95006
#
.
.
.

```

## **Charakterisierung von Forstbeständen mit Hilfe von Laserscanning und Reflexionsmodellierung**

Die Beobachtung und Bewertung von Wäldern ist eins der zentralen Themen der Fernerkundung. Wälder sind auf der Erde die größten Speicher von Biomasse und damit, neben den Ozeanen, die größte Senke für Kohlendioxid. Eine genaue Kenntnis über Zusammensetzung, Zustand und Entwicklung der Wälder ist wegen ihrer vielfältigen Funktionen und ihres großen Anteils an der Landesfläche von großem wissenschaftlichem und gesellschaftlichem Wert. Eine flächendeckende detaillierte Beobachtung ist nur mit fernerkundlichen Mitteln möglich.

Eine vielversprechende moderne Technik für hochauflösende Waldfernerkundung ist luftgestütztes Laserscanning. Ein Laserscanner sendet in definierte Richtungen kurze Laserpulse aus, und misst die Zeit bis zum Empfang von Echos. Wenn die Position des Flugzeugs und seine Ausrichtung im Raum bekannt sind, kann die dreidimensionale Position der Echos bestimmt werden. Die Echos werden entweder als einzelne Punkte oder als zeitlich aufgelöste Wellenformen gespeichert. Für die Arbeit stand ein Laserscanner-Datensatz aus dem Idarwald bei Morbach in Einzelpunkten und als Wellenformdatensatz zur Verfügung.

Zur Vorverarbeitung der Laserscannerdaten wurden die einzelnen Punkte zunächst sortiert und gekachelt. Die Echos werden klassifiziert in Bodenpunkte und Punkte, die von der Vegetation zurückgestreut wurden. Im nächsten Schritt wurden aus den unregelmäßig im Raum verteilten Punkten Rasterbilder erzeugt und die einzelnen Kacheln zu Mosaiken zusammengefügt. Aus der Differenz der resultierenden Gelände- und Oberflächenmodelle können Baumhöhen und die dreidimensionale Struktur von Forstbeständen bestimmt werden. Aus den Wellenformdaten wurde zusätzlich ein Hyperspektralbild erzeugt, das die Intensität der Laserechos in einzelnen Höhenstufen über Grund enthält und neuartige Einblicke in die Bestandsstruktur ermöglicht. Die Wellenformdaten können zur Darstellung von Schnitten durch den Wald genutzt werden. Diese Schnitte zeigen die vertikale oder horizontale Verteilung der zurückgestreuten Laserenergie und damit die Verteilung der Biomasse im Bestand.

Als wichtigster Bestandsstrukturparameter wurde die Baumhöhe sowohl aus den Einzelpunktdaten als auch aus den gerasterten Bilddaten flächendeckend abgeleitet. Dabei wurde eine hohe Übereinstimmung mit Geländemessungen erzielt. Die Kronenuntergrenzen konnten anhand der Wellenformdaten identifiziert werden und stimmten ebenfalls in hoher Genauigkeit mit Geländemessungen überein. Aus Baumhöhen und Höhe der Kronenuntergrenzen konnte die jeweilige Kronenlänge bestimmt werden.

Eine größere Herausforderung ist die Bestimmung der Anzahl der Bäume pro Hektar. Während die einzelnen Kronen älterer Nadelbäume gut erkennbar sind, lassen sich Laubbäume und jüngere Nadelbäume nur schwer identifizieren. Trotzdem konnte mit Hilfe eines adaptiven Moving-Window-Ansatzes eine hohe Übereinstimmung mit im Gelände bestimmten Stammzahlen erzielt werden.

Die Bestimmung des Kronenschlussgrades ist für den Strahlungstransfer und für ökologische Fragestellungen wichtig. Aus Laserscannerdaten kann er über den Anteil von Laserechos vom Boden unter dem Bestand bestimmt werden. Dafür wurden mehrere Methoden verglichen und mit Geländedaten validiert. Aus dem Kronenschlussgrad kann der Blattflächenindex bestimmt

werden, der eine der wichtigsten Größen zur Beschreibung von Waldbeständen ist, da Blätter als größte Oberfläche des Waldes den Austausch von Energie und Stoffen maßgeblich bestimmen.

Eng verknüpft mit dem Blattflächenindex sind die Biomasse und der Holzvorrat, die ebenfalls mit Hilfe der Laserscannerdaten bestimmt werden konnten. Für die Forstwirtschaft ist der Holzvorrat die wichtigste Größe, für die Ökologie ist die Biomasse eine der wichtigsten Größen. Der Holzvorrat kann zwar nicht direkt aus den Laserscannerdaten abgeleitet werden, da aber enge Beziehungen zu Baumhöhe und Stammzahl bestehen, kann er aus diesen statistisch abgeleitet werden. Auch die Biomasse wurde indirekt bestimmt: aus den Baumhöhen und dem Bedeckungsgrad.

Die detaillierteste Charakterisierung von Waldbeständen kann durch Kombination unterschiedlicher Datensätze erreicht werden. Neben dem Laserscanningdatensatz stand auch ein hyperspektrales Bild des Untersuchungsgebiets zur Verfügung. Um diese zu kombinieren, wurde aus den Wellenformen die jeweils über der Fläche eines Hyperspektralpixels zurückgestreute Laserenergie in Höhenschritten von 0.5 m berechnet. Diese Höhenprofile zeigen die Position und Dichte der Baumkronen. Der kombinierte Datensatz wurde für eine Klassifikation zwischen Fichten und Douglasien in jeweils mehreren Altersstufen verwendet und konnte gegenüber dem Hyperspektralbild alleine eine deutliche Verbesserung der Klassifikationsgenauigkeit erzielen.

Als weitere Möglichkeit, die Vorteile von hyperspektraler Fernerkundung mit denen von Laserscanning zu verbinden, wurden Methoden zur Verwendung von Laserscanning für die Invertierung von Reflexionsmodellen entwickelt und getestet. Zwei Bestandsreflexionsmodelle, die Reflexionsspektren aus Parametern wie Baumhöhe oder Chlorophyllgehalt berechnen, wurden verwendet. Die Inversion eines Reflexionsmodells besteht darin, aus einem gegebenen Spektrum auf die Parameter zu schließen. Da unterschiedliche Parameterkombinationen zu fast identischen Spektren führen können, ist die Inversion ein sogenanntes schlechtgestelltes Problem. Eine eindeutige Lösung kann oft nur gefunden werden, wenn ein Teil der gesuchten Parameter vorgegeben wird. Dies kann beispielsweise mit Hilfe von Laserscanning erreicht werden. Da mit Laserscanning Größen bestimmt werden können, die aus einem Reflexionsspektrum nicht eindeutig ableitbar sind, können die Daten verwendet werden, um den Parameterraum bei der Invertierung zu verkleinern und damit die Invertierung zuverlässiger zu machen. Auf diese Weise kann die Ableitung von Größen wie Wasser- oder Chlorophyllgehalt aus hyperspektralen Bilddaten verbessert werden.

Das Bestandsreflexionsmodell FRT wurde mit einer eingebauten analytischen Inversionsroutine einmal mit und einmal ohne Zuhilfenahme der Informationen aus dem Laserscanning invertiert. Die Berücksichtigung der Laserscannerdaten machte die Invertierungsergebnisse dabei stabiler und konnte die Inversion beschleunigen. Das Reflexionsmodell INFORM wurde mit Hilfe von Lookup-Tables und numerisch invertiert. Bei beiden Verfahren konnte die Einbeziehung von Strukturinformationen aus den Laserscanningdaten die Inversion verbessern.

Die Arbeit konnte zeigen, dass luftgestütztes Laserscanning wertvolle Beiträge zur Waldfernerkundung erbringen kann. Größen, die vor der Nutzung von Laserscannern der Fernerkundung nicht oder nur ungenau zugänglich waren, können mit Laserscanning in hoher räumlicher Auflösung und mit hoher Genauigkeit gemessen werden.



# Lebenslauf

Adresse: Henning Buddenbaum  
Zuckerbergstraße 12  
54290 Trier

Staatsangehörigkeit: deutsch

Geburtsdatum: 10.07.1975

Geburtsort: Koblenz

## Schulbildung:

08/1982 – 07/1986: Grundschule Vallendar

08/1986 – 06/1995: Wilhelm-Remy-Gymnasium Bendorf

08/1995 – 07/1998: Ausbildung zum Speditionskaufmann, Kühne & Nagel AG, Bremen

## Studium:

10/1998 – 04/2004: Diplom Angewandte Umweltwissenschaften an der Universität Trier  
Hauptfächer: Fernerkundung, Klimatologie  
Nebenfächer: Geomathematik, Analytische und Ökologische Chemie

Thema der Abschlussarbeit:

Ableitung von Forstparametern aus hyperspektralen

Fernerkundungsdaten unter Verwendung geostatistischer Verfahren

09/2001 – 10/2001: Praktikum beim UN Drug Control Programme, Wien.

08/2002 – 10/2002: Praktikum beim Gesamtverband der Aluminiumindustrie, Düsseldorf

04/2005 – heute: Promotionsstudium am Fachbereich Geographie/Geowissenschaften der Universität Trier

## Berufliche Tätigkeiten:

10/1999 – 03/2005: Wissenschaftliche Hilfskraft in den Fächern Klimatologie, Geomathematik und Fernerkundung und am SFB 522 an der Universität Trier

01/2006 – 12/2007: Bologna-Assistent des Fachbereichs VI an der Universität Trier

01/2009 – 12/2009: Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Interreg-IVa-Projekt Regiowood

04/2005 – heute: Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fach Fernerkundung an der Universität Trier

01/2010 – heute: Wissenschaftlicher Mitarbeiter im EnMAP Core Science Team an der Universität Trier