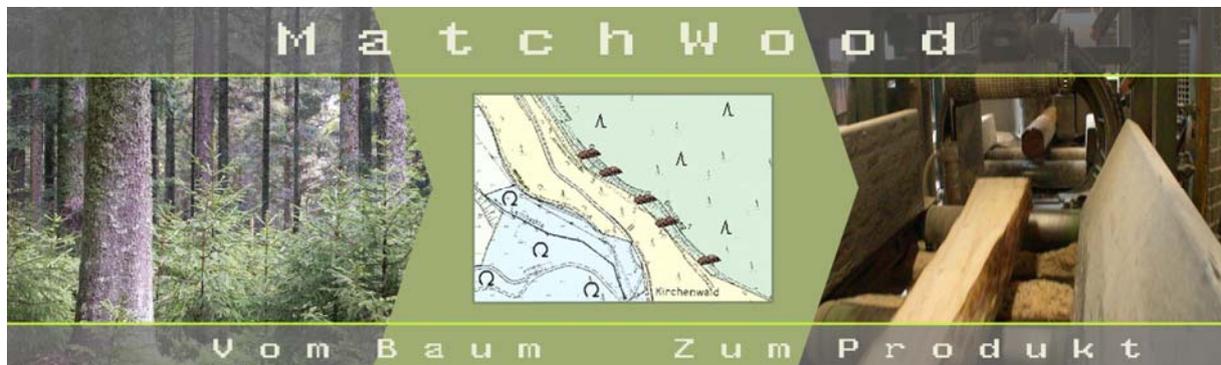


# MatchWood

## Vom Baum zum Produkt:

*Wertschöpfung durch Prozessoptimierung  
im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung*

FKZ: 0330616A/B



## Schlussbericht

### Koordination:

Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker  
Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung





BMBF - Bundesministerium für Bildung und Forschung  
Heinemannstr. 2  
53175 Bonn  
Tel.: +49 (0)228 / 9957 0  
Email: [information@bmbf.bund.de](mailto:information@bmbf.bund.de)



Projektträger Jülich  
Geschäftsbereich Umwelt (UMW)  
Forschungszentrum Jülich GmbH  
Zimmerstraße 26-27  
10969 Berlin  
Tel.: +49 (0)30 / 20 199 431  
Email: [ptj@fz-juelich.de](mailto:ptj@fz-juelich.de)



**Koordination, Teilprojekte 2 und 4**  
Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Werthmannstraße 6  
79085 Freiburg im Breisgau  
Tel.: +49 (0)761 / 203 3764  
Email: [fobawi@fobawi.uni-freiburg.de](mailto:fobawi@fobawi.uni-freiburg.de)



**Teilprojekte 1 und 2**  
Abteilung für Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Tennenbacherstraße 4  
79085 Freiburg im Breisgau  
Tel.: +49 (0)761 / 203 3694  
Email: [ferninfo@felis.uni-freiburg.de](mailto:ferninfo@felis.uni-freiburg.de)



**Teilprojekt 1**  
Institut für Waldwachstum  
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  
Tennenbacherstraße 4  
79085 Freiburg im Breisgau  
Tel.: +49 (0)761 / 203 3737  
Email: [instww@iww.uni-freiburg.de](mailto:instww@iww.uni-freiburg.de)



**Teilprojekt 1**  
Abteilung Biometrie  
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg  
Wonnhaldestraße 4  
79100 Freiburg im Breisgau  
Tel.: +49 (0)761 / 4018 - 194  
Email: [Biometrie.FVA-BW@forst.bwl.de](mailto:Biometrie.FVA-BW@forst.bwl.de)



**Teilprojekte 2 und 3**  
Abteilung Waldnutzung  
Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg  
Wonnhaldestraße 4  
79100 Freiburg im Breisgau  
Tel.: +49 (0)761 / 4018 - 238  
Email: [Waldnutzung.FVA-BW@forst.bwl.de](mailto:Waldnutzung.FVA-BW@forst.bwl.de)

## **Vorwort**

Der Holzvorrat in den deutschen Wäldern ist hoch und steigt dank nachhaltig hoher Zuwächse kontinuierlich an. Zugleich entwickeln Holzindustrie und Energiewirtschaft im In- und Ausland eine wachsende Nachfrage nach dem ökologischen klimaneutralen Rohstoff Holz. Es ist also ökonomisch und ökologisch sinnvoll, diese ungenutzten Potentiale im Rahmen der Nachhaltigkeit besser zu nutzen. Dazu sind präzise Informationen über die Waldbestände erforderlich, die heute vielfach fehlen, da sie nur durch aufwendige terrestrische Inventuren bereitgestellt werden können. Das Problem mangelhafter nutzungsrelevanter Informationen kann durch den Einsatz moderner Instrumente der Fernerkundung und ihre Verknüpfung mit weiteren Optimierungsverfahren gelöst werden. Im Rahmen des Verbundprojekts „MatchWood - Vom Baum zum Produkt“ wurde ein disziplinenübergreifendes Vorgehen unter Verwendung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien entwickelt, mit dem Forstbetrieben die nachfrageorientierte Bereitstellung von Rundholz für die Holzindustrie und Energiewirtschaft ermöglicht wird.

Die bisher üblichen Verfahren der Betriebsinventur und Forsteinrichtung liefern genaue, allerdings nur auf einzelne Punkte beschränkte Beschreibungen von Gelände und Waldbeständen. Im Rahmen des Verbundprojektes entwickelten die Projektpartner neue Auswertungsverfahren und -algorithmen, mit denen die Punktinformationen durch die Verknüpfung von Inventurdaten, flugzeuggestütztes Laserscanning, Multispektraldaten und terrestrischen Laserscanningmessungen vom Punkt auf die Fläche übertragen werden können. Dadurch wird das „Warenlager Wald“ differenziert nach Baumartengruppen und flächenbezogen kennzeichnend beschrieben.

Moderne Instrumente der Fernerkundung (Laserscanning, Multispektraldaten) erlauben die Bereitstellung von Informationen zum Gelände, zu den Waldstrukturen und zu der räumlichen Verteilung des Holzvorrats. Mittels terrestrischem Laserscanning können für die Nutzholzausbeute wichtige Qualitätsmerkmale (Durchmesser, Länge, Kronenansatz) bereits im Wald an stehenden Bäumen ermittelt werden. Mit den Informationen zum Rohholz und zum Gelände wird eine Optimierung der innerbetrieblichen Logistik möglich, so dass die zeit-, kosten-, energie- und emissionsträchtigen Prozesse der Holzernte und des Holztransports auf ein Minimum reduziert werden können. Am Eingang der Sägewerke erlaubt die automatisierte Jahrringbreitenvermessung von Stämmen mit Röntgenscanner bzw. Computertomograph Rückschlüsse auf die Tragfähigkeit und Formstabilität der produzierten Schnittholzprodukte.

Die Ergebnisse wurden im Rahmen des modular aufgebauten Verbundprojektes zu einem entscheidungsunterstützenden System zusammengeführt, mit dem die bedarfsgerechte Bereitstellung von Rundholz gestaltet werden kann, wobei sich für alle beteiligten Marktpartner der Forst-Holz-Kette Vorteile ergeben. Das Projekt wurde durch Praxispartner und Stakeholder aus Holzindustrie, Landesforstverwaltung, Großprivatwaldbesitzer, Forstwirtschaftlichen Vereinigungen und Consultingfirmen begleitet. Sie brachten ökonomischen, technologischen und auch ökologischen Sachverstand ein und kommentierten und testeten die im Rahmen des Projekts erarbeiteten Lösungen. Dadurch wurde gewährleistet, dass die vorgestellten Ergebnisse und Verfahren alltagstauglich und in der Praxis einsetzbar sind.

Für die Zukunft einer kleinteiligen Forstwirtschaft ist es entscheidend, inwieweit aus dem „Warenlager Wald“ die benötigten Holz mengen zum richtigen Zeitpunkt in der erforderlichen Holzqualität bereitgestellt werden können, und zwar bei möglichst niedrigen Kosten und geringen Umweltbelastungen. Gelingt es dieses Wertschöpfungspotential zu nutzen, lässt sich die Wettbewerbsfähigkeit der Forstwirtschaft und der Holzindustrie in Deutschland auch im globalen Kontext gewährleisten. Durch eine an die Probleme und Fragestellungen angepasste Informationsbasis und einer optimierten Logistik kann die gesamte Forst-Holz-Kette im Hinblick auf die Ressourcen- und Energieeffizienz weiter verbessert werden.

Die Ergebnisse aus dem Verbundprojekt „MatchWood - Vom Baum zum Produkt“ stehen auch über das Projektende hinaus auf der Projekthomepage [www.matchwood.uni-freiburg.de](http://www.matchwood.uni-freiburg.de) zur Verfügung.

Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker

## **Inhaltsverzeichnis:**

<b>Koordination</b>	<b>1</b>
Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	1
<b>Teilprojekt 1: Rationelle und präzise Bestandserfassung</b>	<b>21</b>
Abteilung für Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	21
Abteilung Biometrie und Informatik, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg	64
Institut für Waldwachstum, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	91
<b>Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik</b>	<b>132</b>
Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	132
Abteilung für Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	191
Abteilung Waldnutzung, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg	209
<b>Teilprojekt 3: Produktlinie Nadelstammholz: Automatisierte Erkennung und Bewertung von inneren Holzeigenschaften</b>	<b>245</b>
Abteilung Waldnutzung, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg	245
<b>Teilprojekt 4: Produktlinie Nadelindustrieholz: Produktspezifische Holzqualitätsanforderungen und ihre Erfassung</b>	<b>282</b>
Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	282

# Koordination

Institut für Forstbenutzung und Forstliche  
Arbeitswissenschaft

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

## Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	Förderkennzeichen: 0330616A
Vorhabenbezeichnung: MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung Koordination  Jana Seidel-Burger Bernd Becker	
Laufzeit des Vorhabens: 1. September 2005 bis 31. Dezember 2008	
Berichtszeitraum: 1. September 2005 bis 31. Dezember 2008	

## **MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung**

### **Koordination**

Jana Seidel-Burger, Bernd Becker

Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Universität Freiburg

Freiburg, Juni 2009

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Kurze Darstellung des Teilvorhabens</b>	<b>5</b>
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	5
1.2	Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	5
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	5
1.4	Wissenschaftliche und technische Anknüpfung	6
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	7
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>7</b>
2.1	Erzieltes Ergebnis	7
2.1.1	Koordination	7
2.1.2	Transfer	11
2.2	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	11
<b>3</b>	<b>Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht</b>	<b>14</b>
3.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	14
3.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen	15
3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	15
3.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	15
3.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)	15

---

3.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	16
<b>4</b>	<b>Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)</b>	<b>17</b>
<b>5</b>	<b>Anhang</b>	<b>18</b>

# 1 Kurze Darstellung des Teilvorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Koordination hatte folgende Aufgabenschwerpunkte:

- a. organisatorische, unterstützende Funktion für die Forschungspartner der einzelnen Teilprojekte und für die wissenschaftlichen Projektpartner
- b. Geschäftsführung des projektbegleitenden Stakeholder-Panels
- c. Öffentlichkeitsarbeit (Presse, Internetwebsite, Publikationen, Plakate)

## 1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

- Ein Projektbearbeiter 20% und eine wissenschaftliche Angestellte 25% für „Koordination“
- Projektleiter TP2, der gleichzeitig die Projektleitung des gesamten Verbundprojektes ausübte
- Anleitung wissenschaftlicher Hilfskräfte
- Kooperationsvereinbarungen mit den Praxispartnern

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Die in Abschnitt 1.1 genannten Aufgaben stellen Daueraufgaben dar, wurden deshalb projektbegleitend kontinuierlich ausgeführt. Die Koordinationstätigkeiten konnten vom 1. September 2005 bis 31. Dezember 2008 ausgeübt werden.

Es fanden regelmäßige Arbeitstreffen der wissenschaftlichen Projektpartner statt, um Ziele, Konzepte und Strukturen des Dachprojektes zu aktualisieren und die Ergebnisberichte der einzelnen Teilprojekte durch die jeweiligen Bearbeiter vorzustellen.

Insgesamt wurden vier Kolloquien organisiert. Am 07. Februar 2006 fand das Auftakt-Treffen des Projektes statt, am 13. Dezember 2006 und am 18. September 2007 wurden in Statuskolloquien die bis dahin erzielten Forschungserkenntnisse und -ergebnisse dem BMBF und PtJ, den Praxispartnern und Stakeholdern sowie den Forschungspartnern vorgestellt. Am 08. und 09. Dezember 2008 fand die Abschlusstagung zu dem Verbundprojekt statt. Die Abschlussveranstaltung war neben den am Projekt beteiligten Forschungs- und

Praxispartnern auch an Entscheidungsträger und Experten aus der Wissenschaft und Praxis der Forst- und Holzwirtschaft gerichtet.

Aufgrund des tragischen Todesfalls von Herrn Bayer (FVA Baden-Württemberg) im zweiten Projektjahr (2007) und der daraus entstandenen verzögerten Bereitstellung von Geo- und Sachdaten zeichnete sich der Bedarf nach einer viermonatigen kostenneutralen Verlängerung der Projektlaufzeit ab. Ein entsprechender Antrag zur Verlängerung wurde Anfang 2008 bei Frau Neumann / PtJ gestellt. Dem Antrag wurde am 19. Februar 2008 stattgegeben, das Projekt wurde um 4 Monate bis zum 31. Dezember 2008 verlängert.

Somit endete die wissenschaftliche Projektlaufzeit am 1. Dezember 2008, die Projektkoordination am 31. März 2009.

#### **1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfung**

- bekannte Konstruktionen, Verfahren und Schutzrechte

Das Projekt hatte keine Forschungsaufgaben, weshalb Konstruktionen, bekannte Verfahren oder Schutzrechte nicht berührt wurden.

- Angaben Fachliteratur, bekannte Informations- und Dokumentationsdienste

Für die inhaltliche Koordination wurden digitale geographische Datengrundlagen genutzt. Diese Daten wurden vom Land Baden-Württemberg und vom Bund zur Verfügung gestellt und für wissenschaftliche Zwecke unter geregelten Nutzungs- und Veröffentlichungskonditionen genutzt. Im Detail wurden folgende Datengrundlagen verwendet:

- Geodaten der FVA Baden-Württemberg
- Daten der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg
- Daten aus dem Räumlichen Information- und Planungssystem (RIPS) der Landesanstalt für Umwelt, Messung und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW)
- Daten des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Es fanden Zusammenarbeiten mit folgenden Verbundprojekten statt:

- Ostalb
- Starkholz

Im Rahmen des BMBF-Statuskolloquiums II (19. und 20. November 2007) war der Verbund MatchWood vertreten. Hier gab es die Gelegenheit für den inhaltlichen Austausch zwischen den Verbänden HCN, KMU Forstunternehmen und Starkholz.

Das Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik befasst sich vor allem mit der nachfrageorientierten Bereitstellung von Rundholz an die Holzindustrie und der Entwicklung von Logistikkonzepten zur Zusammenführung von Beständen zu Nutzungseinheiten und zur Transportoptimierung. Dabei besteht eine enge Zusammenarbeit mit den Projekten „Ostalb“ (Frau Dr. Tina Baumann), „Starkholz“ (Herr Matthias Holzmann) sowie dem EU-Projekt EFORWOOD (Frau Diana Vötter, Frau Janine Fischbach). Gemeinsam werden standardisierte Prozessketten entwickelt und modelliert. Die Zusammenarbeit dient dem gemeinsamen Erlernen von Programmanwendungen sowie dem Abgleich bestehender Anforderungen der einzelnen Projekte an die Gestaltung logistischer Prozesse und Datenstrukturen.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Erzieltes Ergebnis

#### 2.1.1 Koordination

##### **Datengrundlage, Datenbeschaffung**

Die genauen Projektgebietsgrenzen wurden durch die „Koordination“ festgelegt. Als Projektgebiet diente der südliche und mittlere Schwarzwald, der sich südlich von Freiburg bis Karlsruhe und vom Rheintal über die Vorbergzone bis in die Hochlagen des Schwarzwaldes erstreckt. Daraus ergibt sich eine vielfältige naturräumliche Ausgestaltung. Neben staatlichen Wäldern sind auch große Privatwälder (Projektpartner Fürstlich Fürstenbergische Forstverwaltung) und Kleinprivatwälder (Projektpartner Forstwirtschaftliche Vereinigung Mittlerer Schwarzwald) sowie Kommunalwälder vorhanden (Abbildung 1).

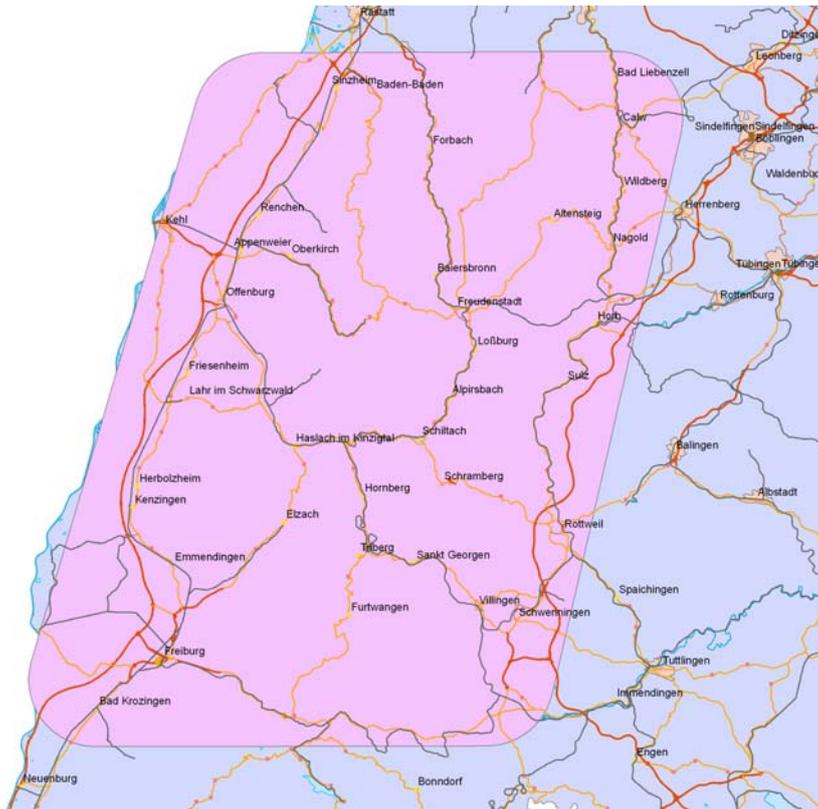


Abbildung 1: Projektgebiet

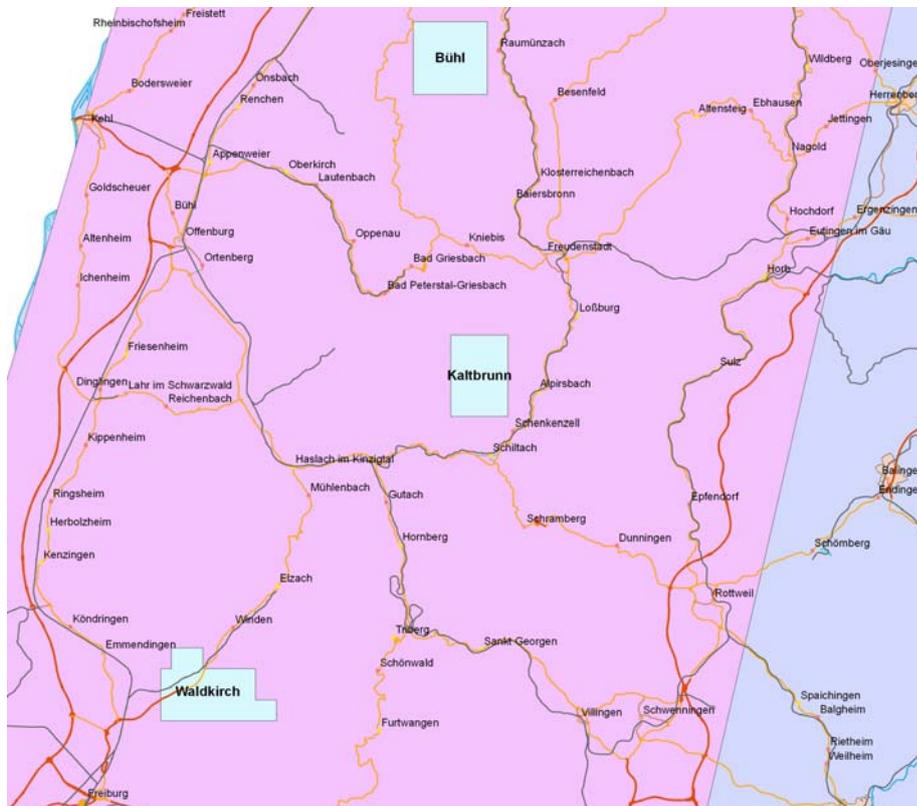


Abbildung 2: Referenzflächen Waldkirch, Bühl und Kaltbrunn

Innerhalb des Projektgebiets wurden wiederum Referenzflächen ausgewiesen, bei denen folgende Kriterien zwingend notwendig waren:

- Verfügbarkeit digitaler Forsteinrichtungsdaten
- Zustimmung des Waldbesitzers

Aus diesen Kriterien wurden als Referenzgebiet der Staats- und Stadtwald Waldkirch und das Teilgebiet Bühl sowie der Großprivatwaldbesitz Kaltbrunn ausgewählt (Abbildung 2).

Von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden Württemberg (FVA) wurden folgende Daten zur Verfügung gestellt:

- Digitale Gelände- und Bestandesdaten
- Digitales Geländemodell (DGM)
- Digitale Forstliche Standortdaten
- Digitale Waldschutzgebietsdaten
- Digitale Waldbiotopdaten
- Forsteinrichtungsdaten (Geometrie- und Sachdaten)
- Betriebsinventur
- Bundeswaldinventur
- Geometrie der Waldentwicklungstypen
- Bodeninformationen
- ATKIS RK10
- ATKIS DTK50
- ATKIS Verkehr, ATKIS Gewässer, ATKIS Nutzung
- Digitale Orthophotos

### **Projekttreffen und Statuskolloquien**

Die Projekttreffen der Forschungspartner und die Statuskolloquien fanden in regelmäßigen Abständen statt, sodass eine sehr effektive Zusammenarbeit zwischen Wissenschaftlern und Praxispartnern gewährleistet werden konnte. Die Praxispartner und das Stakeholder-Panel setzen sich wie folgt zusammen:

#### **Holzindustrie:**

- Stora Enso Deutschland, Moskauer Straße 27, 40227 Düsseldorf (Rickard Arnqvist / Dr. Valkiria Celestiono de Oliveira)
- Sägewerk Echtle, Talstraße 12, 77787 Nordrach (Harald Bröker)
- Sägewerk Läufer, Triberger Straße 51, 79215 Elzach (Ludwig Läufer)
- Sägewerk Späth, Oberweierer Hauptstraße 102, 77948 Friesenheim (Peter Späth)

**Grossprivatwald:**

- Forstbetrieb Fürst zu Fürstenberg, Josefstraße 1178166, Donaueschingen (Dr. Jens Borchers, Martin Herrmann)

**Kleinprivatwald:**

- Forstwirtschaftliche Vereinigung Mittlerer Schwarzwald, Hauptstraße 3877796, Mühlenbach (Joachim Prinzbach)

**Forstservice Unternehmen:**

- LIGNIS GmbH & CO.KG, Stadtbachstraße 9, 86153 Augsburg (Wilfried Möhler)

**Consulting / weitere Stakeholder:**

- landConsult, Spannstattstrasse 40, 77773 Schenkenzell (Dr. Markus Weidenbach)
- EnBW Energy Solutions GmbH, Kriegsbergstraße 11, 70174 Stuttgart (Dr. Joachim Hug)

**Subcontracter:**

- Microtec Brixen s.r.l./GmbH, Durststrasse 98, I-39042 Brixen (BZ)

**Öffentlicher Wald:**

- Landratsamt Rottweil, Königstraße 36, 78628 Rottweil (Bernhard Reuter)
- Landratsamt Schwarzwald-Bahr-Kreis, Am Hoptbühl 2, 78045 Villingen-Schwenningen (Michael Mayer)
- Landratsamt Freudenstadt, Landhausstraße 34, 72250 Freudenstadt (Günther Groß, Bernhard Frey, Michael Hamm, Armin Lohmeyer)

**Forstpolitik:**

- Regierungspräsidium Freiburg – Forstdirektion, Bertoldstraße 43; 79098 Freiburg (Bernhard Schirmer, Hans-Eberhard von Türckheim)

Die Auftaktveranstaltung fand am 07. Februar 2006 in Freiburg statt. Das Dachprojekt, die Projektgebiete und die Datengrundlage wurden vorgestellt. Ziele, Konzepte und Strukturen diskutiert.

Während der Projektlaufzeit fanden zwei weitere Statuskolloquien in Freiburg statt, das II. Statuskolloquium am 13. Dezember 2006 an der Forstlichen Versuchs und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, das III. Statuskolloquium am 18. September 2007 an der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg. Hierbei wurden die Praxispartner über den Projektfortschritt informiert, Zwischenergebnisse präsentiert und die Ziele, Erwartungen und Anforderungen der Praxispartner und Stakeholder diskutiert. Vor allem Fragen des Datenschutzes wurden von den Praxispartnern und den Stakeholdern bei beiden Statuskolloquien kritisch hinterfragt.

**Abschlussstagung**

Die Abschlussstagung fand am 08. und 09. Dezember 2008 in Freiburg statt. Diese Tagung richtete sich neben dem BMBF/PtJ und den beteiligten Praxis- und Forschungspartnern auch an Entscheidungsträger und Experten aus Wissenschaft und Praxis der Forst- und

Holzwirtschaft. Die Veranstaltung wurde in der Tagespresse und in der forstlichen Fachpresse vor angekündigt und beworben. Die Präsentationen der einzelnen Forschungspartner stießen auf großes Interesse und wurden kritisch und konstruktiv diskutiert.

### **2.1.2 Transfer**

Zu Projektbeginn wurde ein Projektflyer erstellt, der bei der Arbeit der Forschungspartner im Projekt als Unterstützungs- und Informationsbroschüre diente (Anlage 1) Dieser Flyer wurde insbesondere bei Informationsveranstaltungen, Tagungen und Messeauftritten ausgelegt und verteilt.

Zudem wurde eine Projektwebseite erstellt, die neben der Austauschfunktion innerhalb des Verbunds auch als Plattform zur Verbreitung der Erkenntnisse und Ergebnisse diente. Während der Projektlaufzeit wurden die Ergebnisse aus den einzelnen Forschungsgruppen sukzessive auf der Projektwebseite bereitgestellt.

Nach der Abschlusstagung am 08. und 09. Dezember 2008 liegen nun auch die endgültigen Ergebnisse auf der Projektwebseite vor. Auch nach Ende der Projektlaufzeit werden die Ergebnisse auf der Webseite verfügbar sein.

Die Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem Verbund MatchWood werden zudem in Lehrveranstaltungen an der Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg an Studierende weitergegeben.

Die Ergebnisse sind zudem in zahlreichen Fachpublikationen und Tagungsbandbeiträgen veröffentlicht worden.

## **2.2 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

### **Veröffentlichungen im Rahmen des BMBF-Projektes „MatchWood - Vom Baum zum Produkt“**

#### **Dissertation:**

BREIDENBACH, J. (2008): Regionalisierung von Waldinventuren mittels aktiver Fernerkundungstechniken. Dissertation an der Universität Freiburg, Inst. f. Forstökonomie.

[http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/5440/pdf/Disertation\\_Breidenbach.pdf](http://www.freidok.uni-freiburg.de/volltexte/5440/pdf/Disertation_Breidenbach.pdf).

MARTIN, G. (2008): Holz- und Fasereigenschaften von Fichte (*Picea abies* (L.) Karst) - Auswirkungen auf die Qualität von Steinschliff und holzhaltigen Publikationspapieren. Inaugural-Dissertation an der Universität Freiburg, Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft.

#### **Publikationen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften:**

BECKER, B., SMALTSCHINSKI, TH., KLÄDTKE, J., BECKER, G. (2009): MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Kundenspezifische Zuordnung von Erntebeständen und Sortimenten. AFZ / Der Wald No. 2, S. 62 - 64

BREIDENBACH, J.; GLÄSER, C. & SCHMIDT, M. (2008): Estimation of diameter distributions by means of airborne laser scanner data. Canadian Journal of Forest Research, NRC Research Press, 38, 1611-1620.

KOCH, B., STRAUB, C., DEES, M., WANG, Y., WEINACKER, H. (2008): Airborne Laser Data for Stand Delineation and Information Extraction. International Journal of Remote Sensing (in print)

WANG, Y., WEINACKER, H., KOCH, B. (2008): A LIDAR point cloud based procedure for vertical canopy structure analysis and 3D single tree modeling in forest. Sensors 2008, 8, pp.3938-3951.

#### **Konferenzen / Tagungsbeiträge:**

BECKER, B.; KLÄDTKE, J. (2008): MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Zuordnung von Erntebeständen unter Berücksichtigung von Ernteplanung und kunden-spezifischen Anforderungen. Vortrag und Konferenzbeitrag im Rahmen der Forstwissenschaftlichen Tagung 2008: Ressourcenknappheit und Klimaänderung: Herausforderungen für die Forstwissenschaft vom 24.09.2008 - 27.09.2008 in Freiburg

BECKER, B.; KLÄDTKE, J. (2008): MatchWood - From Trees to Products: Allocation of Stands in the Context of Harvesting Planning and user-specific Requirements. Vortrag und Konferenzbeitrag im Rahmen der IUFRO ALL-D3 Konferenz vom 15.06.2008 - 20.06.2008 in Sapporo, Japan

BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2008): MatchWood - From Trees to Products: Product-specific Allocation of Raw Material to the Wood Industry. Vortrag im Rahmen der Postervorstellung auf der FORMEC 2008 vom 02.06.2008 - 05.06.2008 in Schmallingenberg

BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2007): MatchWood - From Trees to Products: Product-specific Allocation of Round Wood to the Timber Industry. Vortrag und Konferenzbeitrag im Rahmen der 3rd Forest Engineering Conference vom 01.10.2007 - 04.10.2007 in Mont Tremblant, Canada

BRÜCHERT F., BAUMGARTNER R., SAUTER U.H. (2008): Ring width detection for industrial purposes - use of CT and discrete scanning technology on fresh roundwood . In Gard (ed.): End user's needs for wood material and products. Proceedings, Cost Action E53 Conference 29th - 30th October 2008 in Delft, The Netherlands, 157-164

BRÜCHERT F., BAUMGARTNER R., SAUTER U. H. (2008): Ring width detection for industrial purposes - use of CT and discrete scanning technology on fresh roundwood. Vortrag und Konferenzbeitrag im Rahmen des 6th Workshop "Connection between Forest Resources and Wood Quality: Modelling Approaches and Simulation Software"

SMALTSCHINSKI, TH., BECKER, B., BECKER, G. (2009): Precision Forestry und forstliche Wertschöpfungskette. Vortrag im Rahmen der 29<sup>th</sup> GIL-Konferenz am 09. und 10. März 2009 in Rostock

SMALTSCHINSKI, TH., BECKER, G. (2008): Optimization of back freight transportation systems. Vortrag und Konferenzbeitrag im Rahmen der FAO/ECE-Conference International Seminar on Infrastructure and Transport in Sustainably Managed Forests vom 21.10.2008 - 26.10.2008 in Portoroz, Slowenien

**Poster:**

BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2008): MatchWood - From Trees to Products: Product-specific Allocation of Raw Material to the Wood Industry. Poster zur FORMEC 2008, 02.06.2008 - 05.06.2008, Schmallingenberg

BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2006): MatchWood - Vom Baum zum Produkt (Projektübersicht); Poster zur Forstwissenschaftlichen Tagung, Tharandt

BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2006): MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Product-specific allocation of raw material to the wood industry (Project overview); Poster für das "5th International Symposium Wood Structure and Properties", Sliač, Slovakia

BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2006): MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Welches Holz zu welchem Werk?. Poster für die Interforst 2006, 12.07.06 - 16.07.2006, München

BREIDENBACH, J.; MCGAUGHEY, R. J.; ANDERSEN, H.-E.; KÄNDLER, G.; REUTEBUCH, S. E. (2007): A mixed-effects Model to estimate Stand Volume by means of small Footprint Airborne Lidar Data for an American and German Study Site; ISPRS Workshop Laserscanning and Silvilaser; Helsinki, Finland

### **3 Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht**

#### **3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms**

Das Gesamtvorhaben MatchWood bezieht sich auf den Förderschwerpunkt Nachhaltige Waldwirtschaft, Forschungsfeld 3: Erschließung von Wertschöpfungspotential entlang der Forst-Holz-Kette des BMBF.

Das Projekt trägt dazu bei, das ökologisch und gesellschaftlich anerkannte Konzept der naturnahen Waldwirtschaft mit den Anforderungen einer im globalen Wettbewerb stehenden Holzindustrie zu verknüpfen und damit den Wirtschaftssektor Forst-Holz in Deutschland insgesamt zu fördern und international wettbewerbsfähig zu machen. Der Forschungsansatz ist dabei einerseits ressourcenbasiert (Teilprojekt 1) und berücksichtigt damit die Nachhaltigkeit in umfassendem Sinne. Er ist zum anderen industrie- und damit nachfrageorientiert, indem die Möglichkeiten einer optimalen Zuordnung vom Rohstoff und Produktionsverfahren/Produkt ausgelotet und in ihrem Effekt bewertet werden (Teilprojekt 3 und 4). Als Bindeglied zwischen dem Bereich Ressource (Wald) und dem Bereich Nachfrage und Konsum (Industrie) steht das Konzept des Forest-Warehouse (Teilprojekt 2), in dem unterstützt durch moderne Informationstechnologien der Zugriff zum „wohlsortierten Warenlager Wald“ in effizienter und effektiver Form gestaltet wird. Durch einen prozessorientierten Ansatz werden integrierte Lösungen des Betriebsmanagements sowie der Organisation der Forst-Holz-Kette berücksichtigt. Die optimale Abstimmung von Rohstoff und Produkt sichert zugleich eine ressourceneffiziente Verwendung des nachwachsenden Rohstoffes Holz. Verbesserungen im Bereich von Transport und Logistik führen in der Tendenz ebenfalls zu positiven externen Effekten im Bereich von Verkehr und Umwelt. Darüber hinaus werden im Rahmen des Vorhabens neue Technologien gefördert, die zur

Verbesserung von Dienstleistungen und Produkten führen. Damit wird ein wesentlicher Punkt des breit angelegten Nachhaltigkeitsziels der BMBF Förderung abgedeckt.

### **3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen**

Die Koordination verfolgt keine originären Ziele, daher liegen hierzu auch keine entsprechenden Ergebnisse vor. Die Ergebnisse der Koordinations-, geschäftsführungs- und Transfertätigkeiten wurden in Abschnitt 2.1 dargestellt.

### **3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Der Verwertungsplan wurde wie in Abschnitt 2.1.2 eingehalten.

Die Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem Verbundprojekt MatchWood werden im Rahmen neuer Forschungsanträge genutzt. Diese werden eine Umsetzung der Ergebnisse in der Praxis ermöglichen. Somit finden die Erkenntnisse Einzug in bestehende Prozesse der Holzbereitstellungskette.

### **3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Das Projektgebiet erwies sich von seiner Ausdehnung her als zu groß, Daher wurden, wie in Abschnitt 2.1.1 erörtert, Kerngebiete (Waldkirch, Bühl, Kaltbrunn) ausgewählt, die für die Forschungspartner bei der Projektbearbeitung als Referenzflächen dienten.

### **3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)**

Es wird auf Abschnitt 2.1.2 verwiesen.

### 3.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die Ausgabenplanung konnte eingehalten werden.

*Tabelle 1: Kostenplanung und Kostenbuchung für Albert-Ludwigs-Universität Freiburg (FKZ 0330616A)*

	Ausgaben bis einschl. Dezember 2008					Finanzierungsplan
	2005	2006	2007	2008	alle Jahre	
0812	20.181,96 €	183.116,05 €	139.165,16 €	109.038,20 €	451.501,37 €	426.846,00 €
0817		3.741,09 €	10.634,40 €	6.495,68 €	20.871,17 €	20.000,00 €
0822	901,11 €	14.505,29 €	26.089,41 €	12.889,38 €	54.385,19 €	63.800,00 €
0835	8.400,00 €	5.600,00 €	28.059,29 €	37.362,99 €	79.422,28 €	79.943,00 €
0843	1.060,04 €	6.445,67 €	4.459,53 €	3.634,05 €	15.599,29 €	17.585,00 €
0846		4.463,58 €	3.610,30 €	7.743,41 €	15.817,29 €	26.900,00 €
0850	5.997,20 €				5.997,20 €	8.715,00 €
<b>Summe:</b>					<b>643.593,79 €</b>	<b>643.780,00 €</b>

Die Zeitplanung konnte eingehalten werden. Wegen des Todesfalls von Herrn Bayer ist es allerdings zu einer mehrmonatigen Verzögerung in der Bereitstellung von Geo- und Sachdaten gekommen, die sich jedoch durch eine kostenneutrale Verlängerung um vier Monate und durch eine beschleunigte Bearbeitung während der Projektlaufzeit kompensieren ließ

#### 4 Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel „Koordination“  im Verbundprojekt „MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung“		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Seidel-Burger, Jana Becker, Bernd Becker, Gero		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2008
		6. Veröffentlichungsdatum
		7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Werthmannstraße 6 79085 Freiburg		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen 0330616A
		11. Seitenzahl 20
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		13. Literaturangaben 0
		14. Tabellen 1
		15. Abbildungen 2
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 53170 Bonn		

## 18. Kurzfassung

In der verbundbegleitenden Koordination wurden folgende Aufgaben bearbeitet und koordiniert:

- Datenbeschaffung, Verwaltung, Nutzungsvereinbarungen (in enger Zusammenarbeit mit der FVA Baden-Württemberg)
- Integration der Praxispartner und Stakeholder in das Projekt
- inhaltliche und organisatorische Abstimmung zwischen den Wissenschaftlern und Praxispartnern sichergestellt
- Organisation von Auftakttreffen und Statuskolloquien sowie Bearbeitertreffen, wodurch die intensive und konstruktive Zusammenarbeit sichergestellt werden konnte
- Ergebnistransfer in die Öffentlichkeit durch Veröffentlichungen und Fachvorträgen bei Tagungen
- öffentliche Abschlusstagung für den Transfer der Endergebnisse in die Öffentlichkeit

## 19. Schlagwörter

Koordination, Stakeholder, Geschäftsführung, Zentrale

## 20. Verlag

## 21. Preis

## 5 Anhang

**Teilprojekt 3: Produktlinie Nadelstammholz:  
Automatisierte Erkennung und Bewertung von inneren Holzeigenschaften**

- Entwicklung von Mess- und Signalverarbeitungsprozeduren (Jahringbreite und Astigkeit) für Nadelstammholz aller Stärkeklassen
- Automatisierte Erkennung von inneren Holzeigenschaften (Röntgentechnologie)
- Bewertung der Praxistauglichkeit der diskreten Tomographie und der Computer-Tomographie für den Einsatz in der Sägeindustrie
- Automatisierte Rundholzsortierung

**Teilprojekt 4: Produktlinie Nadelindustrieholz:  
Produktspezifische Holzqualitätsanforderungen und ihre Erfassungen**

- Untersuchung der Rückwirkung unterschiedlicher äußerer und innerer Holzqualität auf die Herstellung und die Qualität von Holzstoff und Papier
- Charakterisierung des Zusammenhangs zwischen den relevanten Holzqualitätsmerkmalen und forstseitig identifizierbaren bzw. beeinflussbaren betrieblichen Parametern (z.B. Standort, Bestandesbehandlung, Holzernte und Transport)
- Erarbeitung von Instrumenten für eine effektive und effiziente Erkennung und Steuerung der Holzeigenschaften

**Koordination und Kontakt:**

Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft  
Albert-Ludwig-Universität Freiburg  
Prof. Dr. Dr. h.c. Gero Becker  
Dipl.-Forstwirt Bernd Becker  
Werdering 6

79085 Freiburg im Breisgau

Tel.: +49 (0)761 – 203 3764  
Fax: +49 (0)761 – 203 3763



Bundesministerium  
für Bildung  
und Forschung



Projektträger Jülich  
Forschungszentrum Jülich GmbH

# MatchWood

## Vom Baum zum Produkt

*Wertschöpfung durch  
Prozessoptimierung im Rahmen  
naturnaher Waldbewirtschaftung*



MatchWood  
Von Baum zum Produkt

**Email:**  
[info@matchwood.de](mailto:info@matchwood.de)

**Internet:**  
<http://www.matchwood.de>

**BMBF - Verbundprojekt**




## „MatchWood vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung“

gefördert vom Bundesministerium für Bildung und Forschung, FKZ 0330616

Eine naturnahe Waldbewirtschaftung ist in Deutschland aus ökologischen und gesellschaftspolitischen Gründen erwünscht und wird als Leitbild sowohl von öffentlichen wie auch von privaten Waldbesitzern weithin akzeptiert. Die Zukunft einer differenzierten und kleinteiligen Forstwirtschaft, sowie der Fortbestand und die Wachstumschancen der Holzindustrie in Deutschland und in Mitteleuropa hängen entscheidend davon ab, in wie weit aus dem „Warenlager Wald“ über zeitlich und räumlich präzise gesteuerte Nutzungen die benötigten Holz mengen zum richtigen Zeitpunkt, in der erforderlichen Menge und mit der jeweils benötigten spezifischen Holzqualität in umfassendem Sinne nachhaltig und kostengünstig bereit gestellt werden können.

Das Verbundprojekt **MatchWood** hat zum Ziel, den Material- und Informationsfluss zwischen Baum und Produkt in Hinblick auf eine höhere Wertschöpfung für alle Beteiligten nach den Grundsätzen der Prozessorientierung zu analysieren, zu gestalten und zu optimieren, um somit das Konzept der naturnahen Waldwirtschaft mit den Anforderungen einer im globalen Wettbewerb stehenden Holzindustrie zu verknüpfen. Damit soll der Wirtschaftssektor Forst-Holz in Deutschland insgesamt gefördert und die internationale Wettbewerbsfähigkeit verbessert werden.

Teilprojekt	Federführer/Partner	Externe Beteiligte
<b>(1)</b> Rationelle und präzise Bestandeserfassung	Institut f. Waldwachstum, Uni Freiburg Institut f. Fernerkundung, Uni Freiburg Abt. Biometrie und Informatik, FVA Baden-Württemberg	Fa. LandConsult
<b>(2)</b> Allokation - Forest Warehouse und Logistik	Institut f. Forstbenutzung, Uni Freiburg Abteilung f. Fernerkundung, Uni Freiburg Abt. Waldnutzung, FVA Baden-Württemberg	Forstbetrieb Fürst zu Fürstenberg Forstwirtschaftliche Vereinigung Mittlerer Schwarzwald (FMS) Lignis Forsttechnik u. Logistik
<b>(3)</b> Produktlinie Nadelstammholz: Automatisierte Erkennung und Bewertung von inneren Holzeigenschaften	Abt. Waldnutzung, FVA Baden-Württemberg	Fa. Microtec, Mess- u. Scantechnik
<b>(4)</b> Produktlinie Nadelindustrieholz: Produktspezifische Holzqualitätsanforderungen und ihre Erfassungen	Institut f. Forstbenutzung, Uni Freiburg	Stora Enso Forest

### Teilprojekt 1: Rationelle und präzise Bestandeserfassung

- Darstellung der räumlichen Verteilung der Waldstruktur und des Holzvorrates mittels automatisierter Auswertungsverfahren
- Rationalisierung und Effizienzsteigerung von Inventuren durch Regionalisierung der terrestrischen Stichprobenpunkte auf Basis der flächendeckend vorliegenden flugzeuggetragenen Laserscannerdaten

### Teilprojekt 2: Allokation- Forest Warehouse und Logistik

- Abschätzung der sich aus Inventurdaten und waldbaulichen Rahmenbedingungen ergebenden Nutzungsmengen nach Baumarten, Sorten und Qualität
- Zuordnung der Rohholzmerkmale an Produkthanforderungen der Holzindustrie („Matching“)
- Entwicklung von Logistiklösungen zur Zusammenführung von Beständen zu Nutzungseinheiten (Sorten, Qualitäten, Erntezeitpunkte, Geländemerkmale) und zur Transportoptimierung

# Teilprojekt 1: Rationelle und präzise Bestandese Erfassung

Abteilung für Fernerkundung und  
Landschaftsinformationssysteme

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

## Schlussbericht

---

Zuwendungsempfänger: Institut für Fernerkundung, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	Förderkennzeichen: 0330616A
---	--------------------------------

---

Vorhabenbezeichnung:

MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung

Teilprojekt 1: Rationelle und präzise Bestandese Erfassung

Holger Weinacker

---

Laufzeit des Vorhabens:

1. September 2005 bis 31. Dezember 2008

---

Berichtszeitraum:

1. September 2005 bis 31. Dezember 2008

---

# MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung

## Teilprojekt 1: Rationelle und präzise Bestandeserfassung

Holger Weinacker

Abteilung für Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme, Universität Freiburg

Freiburg, Juni 2009

## Inhaltsverzeichnis

<b>1. Kurze Darstellung des Teilvorhabens</b>	<b>25</b>
1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung	25
1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	25
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	25
1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfung	26
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	27
<b>2 Eingehende Darstellung</b>	<b>27</b>
2.1 Erreichte Ergebnisse	27
2.1.1 Konzeption und Datengrundlagen	27
2.1.2 Nutzung und Auswertung von Full-Waveform Laserdaten	28
2.1.3 DOM/DGM Verbesserungen und Erweiterungen	29
2.1.4 Semi-automatische Waldwege- und Waldstrassenerkennung	32
2.1.5 Trennung Wald und offene Landschaft und Siedlungsgebieten	35
2.1.6 Automatische Bestandeseinheitenerkennung	37
2.1.7 Ableitung von zusätzlichen forstlichen Parametern	38
2.1.8 3-D Extraktion/Modellierung von Einzelbäumen	40
2.1.9 Integration von terrestrischen Laserdaten ins Softwaresystem TreesVis	43
2.1.10 Integration bzw. Entwicklung aller Module ins Softwaresystem TreesVis	47

---

2.2	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans	47
2.3	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	48
2.4	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	50
<b>3</b>	<b>Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht</b>	<b>50</b>
3.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	50
3.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen	51
3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	52
3.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	53
3.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)	53
3.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	54
<b>4</b>	<b>Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>58</b>
<b>6</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>60</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>60</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>63</b>

## **1. KURZE DARSTELLUNG DES TEILVORHABENS**

### **1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung**

Das Ziel von TP1 war es, über automatisierte Auswerteverfahren Informationen zur geforderten räumlichen Verteilung des Holzvorrates und der Waldstrukturen bereitzustellen. Dabei wurden sowohl für das terrestrische- als auch für das Flugzeuggetragene Laserscanning Methoden entwickelt, die eine möglichst automatische Ableitung der entsprechenden Größen erlauben. In den Algorithmen wurden teilweise auch Multispektraldaten eingebunden, um den Holzbewirtschaftern ein flächendeckendes Informationsangebot zur Verfügung stellen zu können. Als Modellregion wurde der Mittlere- bis Nördliche Schwarzwald, etwa zwischen Offenburg und Karlsruhe gewählt. Für dieses Gebiet lagen die Laserdaten schon zu Beginn der Projektlaufzeit im Landesvermessungsamt B.-W. (LVA B.-W.) flächendeckend vor. Zusätzlich wurde im Gebiet der Stadt Waldkirch eine spezielle Laserbefliegung durchgeführt. Dabei kam ein Full-Waveform Laserscanner zum Einsatz. Dadurch war es möglich die entwickelten Methoden nicht nur in unterschiedlichen topographischen und forstlichen Situationen zu testen, sondern es war ebenfalls möglich den Einfluss von unterschiedlichen Punktdichten zu untersuchen. Außerdem werden beim Full-Waveform Scanner zusätzlich zu den First-/Last Pulsen der Landesvermessungsbefliegung noch viele Signale in der Zwischenschicht, d.h. in dem Bereich Krone–Boden, aufgezeichnet. Dies ist natürlich für die 3D-Einzelbaumdelineierung, die auf den 3D-Laserpulses basiert von Vorteil.

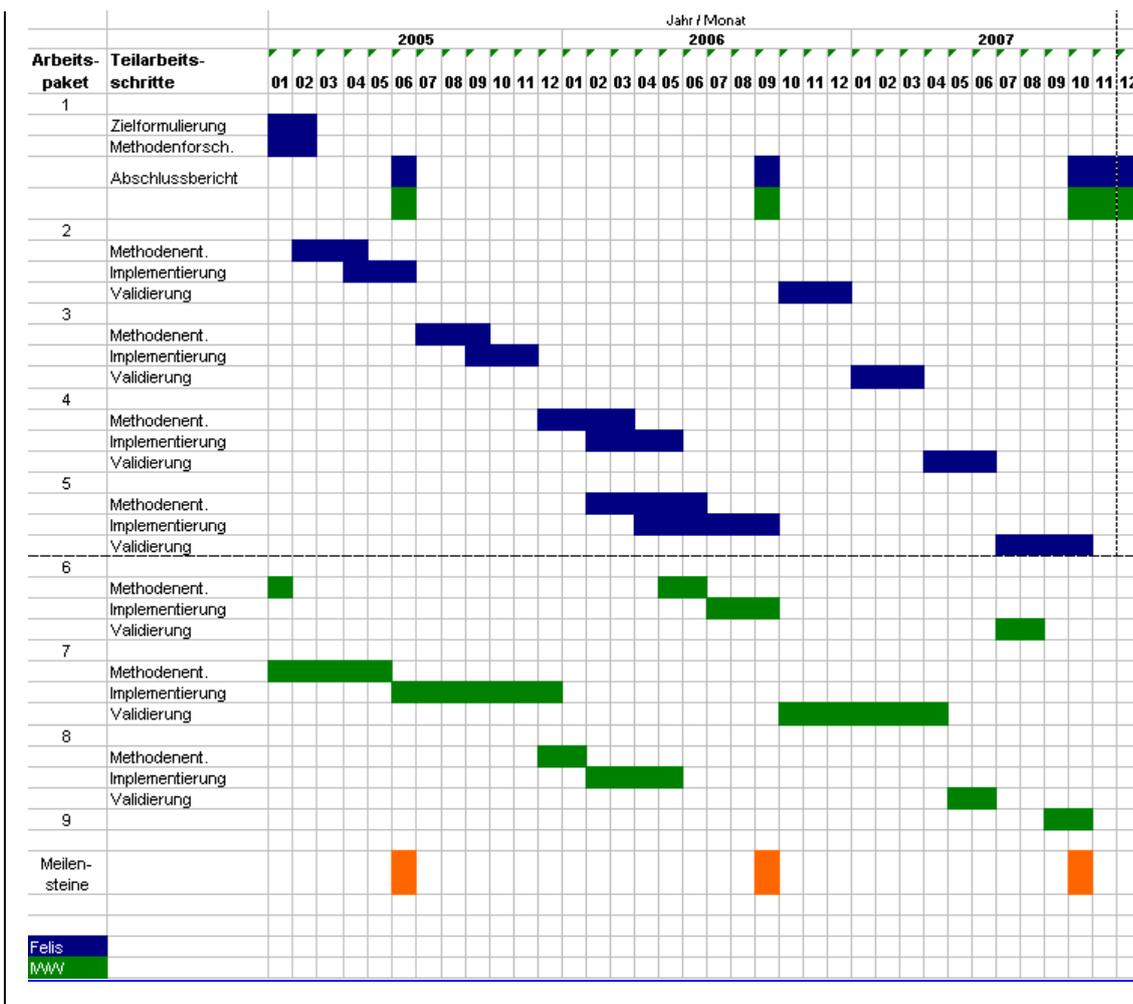
### **1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

- Ein Projektleiter für das Teilprojekt
- Teilweise mehrere Mitarbeiter zur Entwicklung und Implementierung der entwickelten Methoden und Algorithmen
- Anleitung von wissenschaftlichen Hilfskräften
- Nutzungsvereinbarungen und –rechte regelten die Verfügbarkeit und Verwendung der Laserdaten vom Landesvermessungsamt B.-W.

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Die Projektbeschreibung, auf deren Grundlage der Zuwendungsbescheid erstellt wurde, war die Basis für die Planung und den Ablauf des Teilprojektes TP1. Die geplanten Arbeitspakete sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1: Originärer Zeitplan des Teilprojektes TP 1



Die eigentliche Durchführung wurde im Grossen und Ganzen an dieser Zeitplanung ausgerichtet. Allerdings wurden zusätzliche Entwicklungen ins TreesVis Modul, das bis zu diesem Zeitpunkt ausschließlich flugzeuggetragene Laserdaten behandelt, integriert. Hier ist insbesondere die Integration von terrestrischen Laserdaten, d.h. das Einlesen, Visualisieren und die Georeferenzierung, zu nennen. Diese Erweiterungen waren sinnvoll, da damit die Vorteile beider Lasersysteme bzw. der Daten, die von diesen Systemen geliefert werden, in Zukunft kombiniert werden können. Die Waldwege- und Straßenerkennung wurde ebenfalls zusätzlich in den Bearbeitungsplan aufgenommen und erfolgreich abgearbeitet.

#### 1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfung

Die Abteilung Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme (FeLis) beschäftigt sich seit 1998 mit der Auswertung von flugzeuggetragenen Laserdaten. Hierbei liegt der Schwerpunkt bei der Ableitung von forstlichen Parametern. Die grundlegenden Algorithmen in diesem Bereich wurden in den Projekten Highscan und insbesondere im BMBF Projekt

NATSCAN erstellt. Um die forstlichen Parameter letztendlich bestimmen zu können, müssen viele vorbereitende Algorithmen durchlaufen werden. Dies ist z.B. die Berechnung von digitalen Oberflächen- und Geländemodellen, die Abgrenzung von Vegetation, Gebäuden und Straßenflächen. Des Weiteren sollten diese Daten dem Nutzer bzw. dem Entwickler der Algorithmen in einer visuell verständlichen Art und Weise präsentiert werden. Deshalb wurde am Institut in den Vorläuferprojekten ebenfalls ein Tool zur 3D-Echtzeitvisualisierung entwickelt. All diese unterschiedlichen Module waren die Basis, auf der die Entwicklungen in diesem Projekt aufgebauten. Durch die Erweiterungen und die Entwicklung von neuen Methoden, die in diesem Projekt notwendig waren, konnte das Wissen das bei FeLis in diesem Bereich vorhanden war, wesentlich erweitert werden.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Intensive Kooperation mit allen wissenschaftlichen Projektpartnern, vor allem denen aus Teilprojekt 1, Arbeitspaket 2, d.h. dem Institut für Waldwachstum (IWW) und mit der forstlichen Versuchsanstalt B.-W. (FVA), Arbeitspaket 3. Des Weiteren ebenfalls mit dem Institut für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft (FobAwi), Teilprojekt 2. Selbstverständlich fand auch ein reger Informationsaustausch zwischen unserem Mitarbeiter im Teilprojekt 2, Arbeitspaket „Forest Warehouse“ statt. Einer der intensivsten Kontakte war die Zusammenarbeit mit dem Softwareentwickler Rudolf Weinacker, als Auftragnehmer im TP1. Außerdem fanden regelmäßige Kontakte mit unseren Stakeholdern, insbesondere mit der Firma LandConsult, dem Forstbetrieb Fürst zu Fürstenberg (FFS) und der forstwirtschaftlichen Vereinigung Mittlerer Schwarzwald (FMS) statt.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Erreichte Ergebnisse

#### 2.1.1 Konzeption und Datengrundlagen

Als Datengrundlagen dienten zum einen die First- und Lastpulse Daten der Landesvermessung Baden-Württemberg (LVA B.-W.) innerhalb der gewählten Testgebiete. Diese Laserdaten haben einen mittleren Punktabstand von 1,5m (gültig für die first-pulse Punkte) und lagen im Lagesystem Gauss-Krüger und im Höhensystem NN vor. Aus diesen 3D Punkthaufen wurden digitale Oberflächen- und Geländemodelle berechnet. Diese dienten dann zusammen mit den 3D-Punkthaufen als Grundlage zur Berechnung aller weiteren Daten und Parameter. Im Gebiet Waldkirch lagen zusätzlich noch Full-Waveform Laserdaten aus einer speziell für dieses Projekt durchgeführten Befliegung vor. Diese hatten einen mittleren Punktabstand von ca. 0,5m. In einem ersten Schritt wurden aus dem komplett zurückgestrahlten

Lasersignal die 3D-Punkte und zusätzliche Informationen extrahiert. Danach konnte mit diesen Daten weiter gearbeitet werden, wie mit den Daten vom LVA B.-W.

## 2.1.2 Nutzung und Auswertung von Full-Waveform Laserdaten

Im Teilgebiet Waldkirch wurde eine Befliegung mit einem Full-Waveform System durchgeführt. Die von der Firma IGI GmbH gelieferten Daten waren die „reinen“ Rohdaten, d.h. es wurden keine 3D Laserspots, wie dies der Fall ist bei den LVA Daten, sondern der komplett reflektierte Laserstrahl zur Verfügung gestellt. Abbildung 1, zeigt einen solchen Strahl. Dabei präsentieren die „gauss-förmigen“ Erhöhungen die zurückgesandte Intensität bei jedem Treffer. Die Aufgabe bestand darin, alle Treffer automatisch in jedem zurückgesandten Strahl zu erkennen und mit einer Funktion anzupassen. Folgende Parameter wurden für jeden erkannten Treffer (Peak) berechnet: die Amplitude (d.h. die Höhe des Ausschlags des reflektierten Signals), die Weite des Signals (im Wendepunkte der durch das Signal gelegten ausgleichenden Gaußfunktion) und die Lage der Spitze des Signals, da daraus mit Hilfe der Positionsangaben des im Flugzeug befindlichen GPS und IMU Systems, letztendlich die 3D-Koordinaten jedes einzelnen Pulses berechnen wurden (siehe Abb. 1).

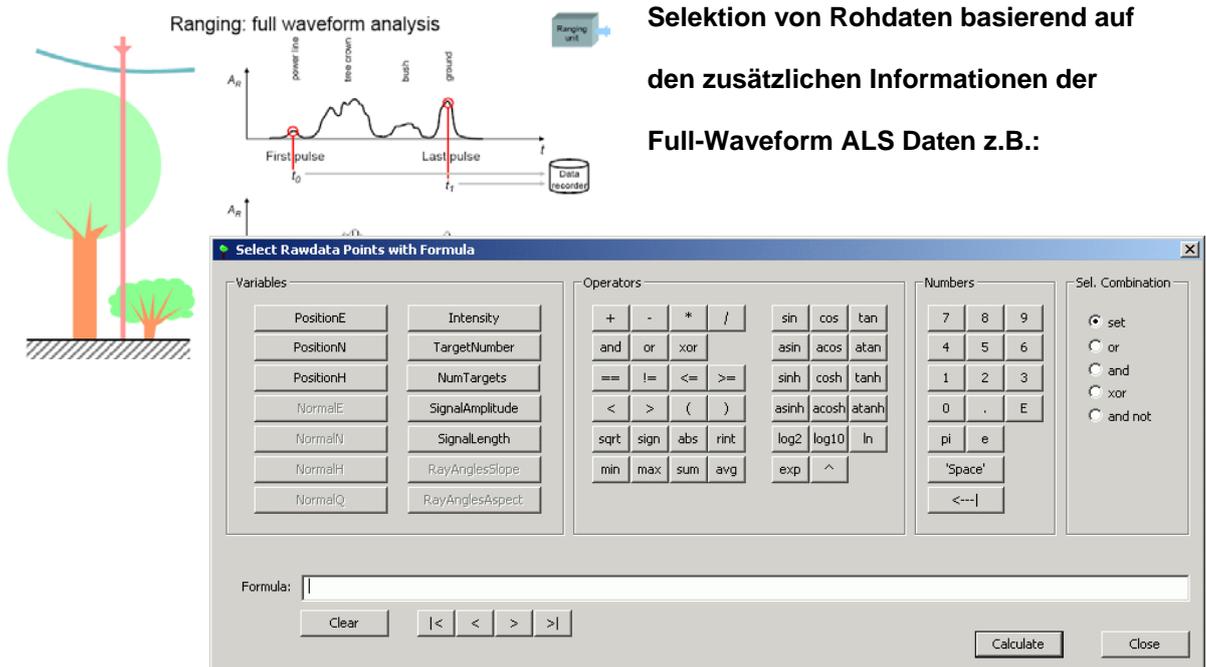


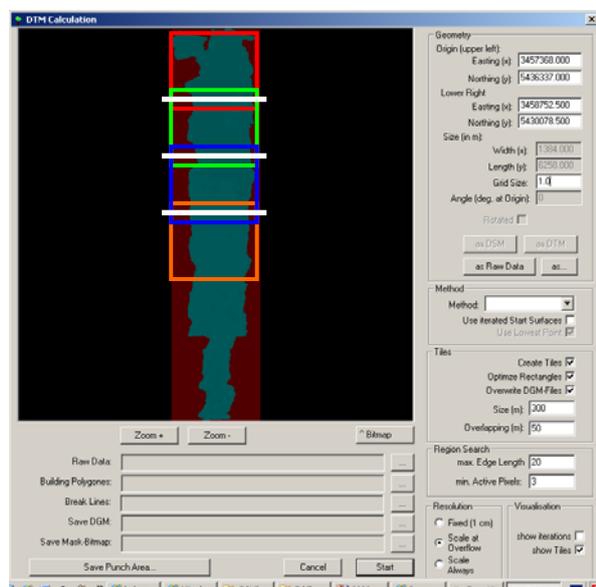
Abbildung 1: Zeigt einen komplett zurückgestrahlten Laserimpuls. Die „gauss-förmigen“ Ausschläge repräsentieren potentielle Reflektionen an Objekten. Im dargestellten Berechnungsfenster werden alle möglichen Parameter, die aus diesen Daten für jeden Treffer (Pulse) extrahiert werden können, aufgezeigt. Dies ist die 3D Position, die Intensität, die Pulsweite, die Amplitude, die Pulsnummer und die Anzahl aller in einem reflektierten Strahl aufgetretenen Pulse

Um all diese Informationen speichern zu können, war es notwendig das bereits existierende binäre Datenformat (\*.rwb) wesentlich zu erweitern. In der neuesten Formatversion besteht

die Möglichkeit, nicht nur die Koordinaten jedes Punktes abzuspeichern, sondern auch die oben aufgeführten Informationen, wie z.B. die Intensität, die Amplitude oder die Weite des Signals. Zusätzlich können Informationen über den ausgesandten Strahl gespeichert werden, z.B. der Richtungsvektor des Laserstrahls. Das entwickelte Datenformat weicht vom LAS-Standard (ASPRS) ab, es ist jedoch möglich Laserrohdaten die im LAS-Standard vorliegen in dieses Format zu importieren. Der Grund, dass TreesVis nicht auf dem LAS-Standard basiert liegt darin dass der LAS-Standard, in der zur Zeit vorliegenden Version, es nicht ermöglicht „große“ Rohdatenmengen in Echtzeit zu visualisieren und für weitere Echtzeitberechnungen bereitzustellen. Dies war und ist eines der wichtigsten Ziele bei der Entwicklung des Softwaresystems.

### 2.1.3 DOM/DGM Verbesserungen und Erweiterungen

Die Anpassung der existierenden Algorithmen und Softwaremodule, im Rahmen dieses Forschungsprojektes, an die Laserdaten der Landesvermessung (LVA) und der Full-Waveform Laserdaten wurde in einem ersten Erweiterungsschritt realisiert. Daran anschließend wurde die Aufgabe in Angriff genommen den Berechnungsalgorithmus so zu erweitern, dass für „beliebig“ große Flächen, sowohl das digitale Oberflächen- (DOM) als auch das digitale Geländemodelle (DGM) berechnet werden können. Hierbei wurde folgende Lösungsvariante gewählt.



**Kachelung des zu berechnenden**

**Gebietes (freie Größenwahl)**

**Wählbarer Überlappungsbereich der  
benutzten Laserpulses, dadurch  
gleiche Höhen an den Schnittlinien**

Abbildung 2: Berechnung von beliebig großen DOM/DGM durch die Aufteilung des Projektgebietes in frei wählbare Kacheln, die nahtlos aneinander liegen. Zur Berechnung können Überlappungsgebiete, der für die Berechnung notwendigen und benutzten Laserpunkten gewählt werden. Dadurch wird in praktisch allen Fällen gewährleistet, dass für die Höhen an den Berührungslinien der Kacheln immer dieselben Werte auftreten.

Das komplette Gebiet wird in einem Fenster angezeigt, daraufhin kann der Nutzer wählen ob das Gebiet gekachelt wird. Dabei ist es möglich, sowohl die Länge als auch die Breite der Kacheln unabhängig voneinander zu wählen (Abbildung 2). Des Weiteren werden die Rohdaten nicht mehr explizit ins Programm eingeladen sondern nur virtuell. D.h. es werden in einem ersten Schritt nur die Lageinformationen gespeichert, wo welche Laserdaten im Gebiet zu liegen kommen. Erst wenn diese Daten, dann wirklich im iterativen Prozess benötigt werden, werden sie explizit geladen. So bald sie nicht mehr für die Berechnung gebraucht werden, wird der Speicherplatz den sie belegt haben freigegeben. Mit diesen zwei Maßnahmen ist es möglich fast beliebig große Gebiete zu berechnen. Außerdem besteht die Möglichkeit in einem zweiten Schritt alle berechneten Kacheln einzuladen und danach ein beliebiges Teilgebiet (abgegrenzt durch ein rotierbares Rechteck) aus dem Gesamtgebiet auszuwählen und z.B. zu visualisieren bzw. die entsprechenden Rohdaten, die innerhalb dieses Teilgebietes liegen, für weitere Berechnungen ins Programm zu laden. Diese Möglichkeit zeigt Abbildung 3.

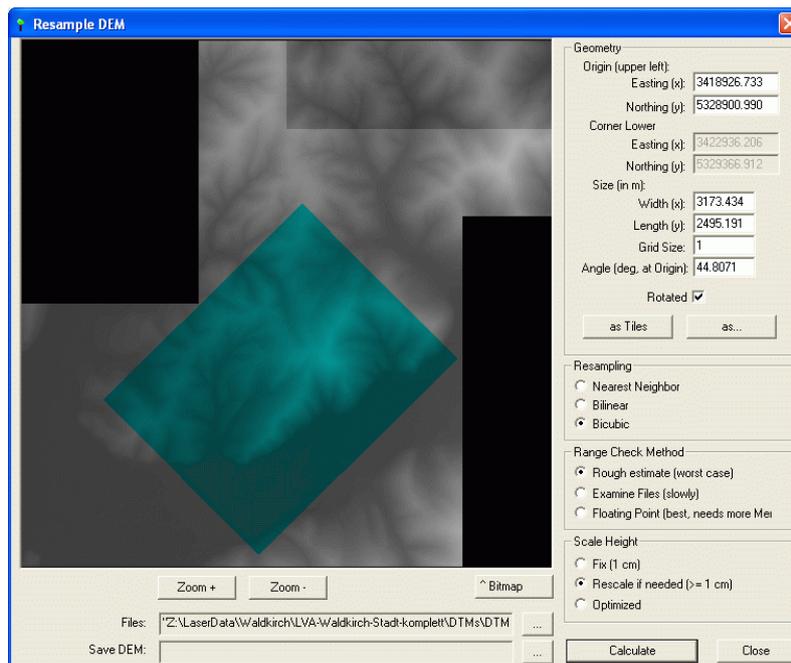


Abbildung 3: Auswahl eines Teilgebietes (blau) aus dem gekachelten Gesamtgebiet (grau) mit der Möglichkeit, dieses Gebiet mit einer anderen Auflösung zu berechnen. Dazu kann der ausgewählte Bereich (blau) mit unterschiedlichen Interpolationsmethoden „resampled“ werden, z.B. bilinear oder bikubisch

- Berücksichtigung von gegebenen und automatisch abgeleiteten Bruchkanten im Algorithmus:

Im Softwaremodul wurde die Möglichkeit integriert bekannte Bruchkanten bei der Berechnung von DOM/DGM zu berücksichtigen.

Außerdem wurden Vorverarbeitungsschritte, die zur automatischen Erkennung und Integration von Bruchkanten notwendig sind, in den DGM-Algorithmus eingebunden. Der Vorverarbeitungsschritt zur automatischen DGM-Kanten-Extraktion besteht aus zwei Teilschritten:

- a. Normalenbestimmung für jeden Rohdatenpunkt (Abbildung 4). In diesem Teilbereich wird für jeden vorhandenen Laserstrahl unter Berücksichtigung von  $k$  Nachbarpunkten dessen Normalenvektor und ein Bestimmtheitsmaß berechnet. Bei der Visualisierung wird der Betrag des Bestimmtheitsmaßes, als Länge für den Normalenvektor eingesetzt. Dadurch kann man direkt visuell überprüfen, welche Normalenvektoren ein hohes Bestimmtheitsmaß besitzen. Je länger der Vektor ist, desto zuverlässiger konnte der Vektor berechnet werden.
- b. Segmentierung der Rohdaten in Ebenen (Abbildung 5): Basierend auf Ideen von Hoppe und Tovar/Pfeiffer (2005), werden in diesem Verarbeitungsschritt die Laserdaten zu Segmenten gruppiert. Hierzu wird der 3D-Abstand zu einer Fläche, die selbst aus den zu untersuchenden Punkten abgeleitet wird, und dem zu testenden Laserpunkt berechnet. Beim Test, ob der zu untersuchende Punkt zur Fläche gehören soll oder nicht, wird auch dessen Normalenvektor berücksichtigt. Jeder zu einer Bezugsfläche gruppierte Laserpunkt, beeinflusst natürlich die Bezugsfläche selbst, d.h. es wird nach dem Hinzufügen eines neuen Laserpunktes eine neue Fläche berechnet, die dann als Bezugsfläche für den nächsten zu untersuchenden Punkt verwandt wird. Dieser iterative Prozess wird so lange fortgesetzt bis kein neuer Punkt mehr gefunden wird, der zur Bezugsfläche gehört. Dann wird aus einem neuen Basisset von Rohdatenpunkten wieder eine neue Bezugsfläche erzeugt und der Segmentierungsprozess beginnt von neuem.

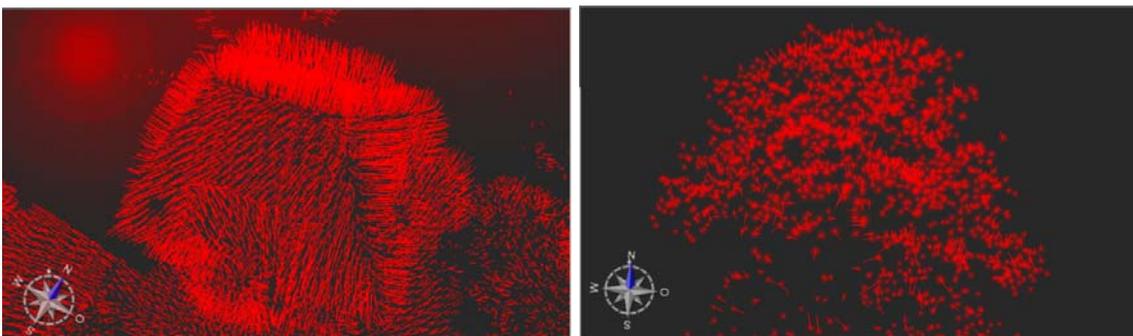


Abbildung 4: Das linke Bild zeigt Laserspots und deren Normalenvektoren die vom Dach eines Gebäudes reflektiert wurden. Eine gleichmäßige Ausrichtung ist deutlich sichtbar, außerdem ist die Länge der Vektoren groß, was zeigt das berechnete Bestimmtheitsmaß bei solchen ebenen Objekten wesentlich besser ist, als z.B. bei Vegetation. Im rechten Bild sind die Normalenvektoren von Laserspots die von einer Krone eines Baumes reflektiert wurden, visualisiert. Hier sind die Vektoren sowohl kurz und vollkommen unregelmäßig orientiert. Was wiederum als Indiz für die Zugehörigkeit dieser Punkte zur Klasse Vegetation eingesetzt werden kann.

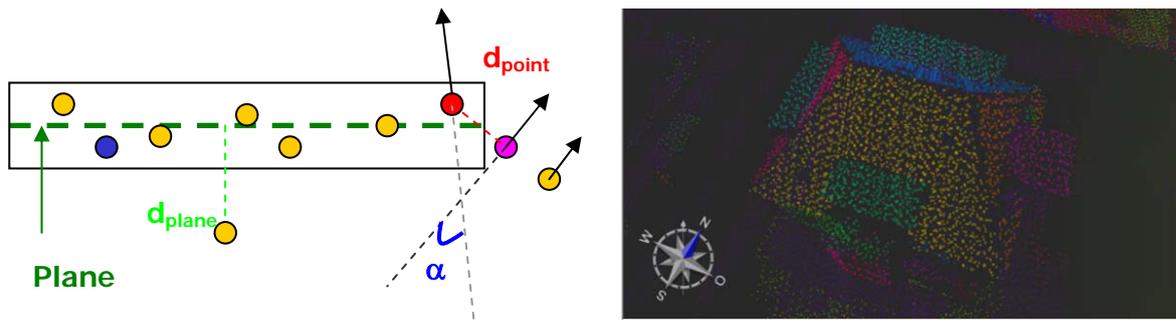


Abbildung 5: Basierend auf der Methode von Hoppe und Tovari/Pfeifer 2005, wurden Laserpunkte die „ähnliche“ Normalen besitzen zu Punktgruppen, die Ebenen repräsentieren, segmentiert (linkes Bild). Das rechte Bild zeigt ein Hausdach bei dem die Laserpunkte als Ergebnis zu Flächen (Dachflächen) gruppiert wurden.

Beide Methoden wurden implementiert und bilden die Basis für die endgültige automatische Bruchkantenextraktion. Außerdem bilden die hier erhaltenen Informationen die Eingabewerte zur automatischen Modellierung von Gebäuden.

#### 2.1.4 Semi-automatische Waldwege- und Waldstrassenerkennung

Ein fundiertes Wissen über das Waldstrassennetz ist unter anderem entscheidend für die Berechnung von Abfuhrplänen. Nicht nur die Lage der Straßen, sondern ebenfalls deren Breite, Kurvenradi, Steigungen und der offene Lichtraum sind Informationen die zur Klassifikation notwendig sind, jedoch mit den gebräuchlichen Messverfahren (z.B. GPS) in der Regel nicht aufgenommen werden, da dies den Zeitaufwand, d.h. den Kostenrahmen, sprengen würde. All diese Daten können jedoch abgeleitet werden, wenn Laserdaten mit der notwendigen Punktdichte, vorliegen. Außerdem ist sowohl die Lage- als auch die Höhengenaugigkeit, die man aus Laserdaten ableiten kann, im Wald höher als die aus GPS Messungen. Dies sind die Gründe weshalb wir uns entschlossen hatten ein semi-automatisches Verfahren zur Waldstraßenerkennung zu implementieren.

Abbildung 6 verdeutlicht die Idee des Extraktionsalgorithmus mit Hilfe der Darstellung eines digitalen Geländemodells (Abb. 6 links) bzw. eines Neigungsbildes (Abb. 6, rechts). Geringere Neigungen werden mit einem kleineren, d.h. dunkleren, Grauwert dargestellt. Es ist klar erkennbar, dass die Steigung entlang der Strassen bzw. Wege geringer ist, als im umgebenden Gelände. Diese Annahme trifft für viele Wege und Strassen in Mittelgebirgen zu. Normalerweise befinden sich links und rechts der Straße Böschungen, die nochmals wesentlich steiler als die Straße selbst sind. Das Gelände sollte ca. 10% Steigung besitzen, damit das Verfahren zufriedenstellend funktioniert.

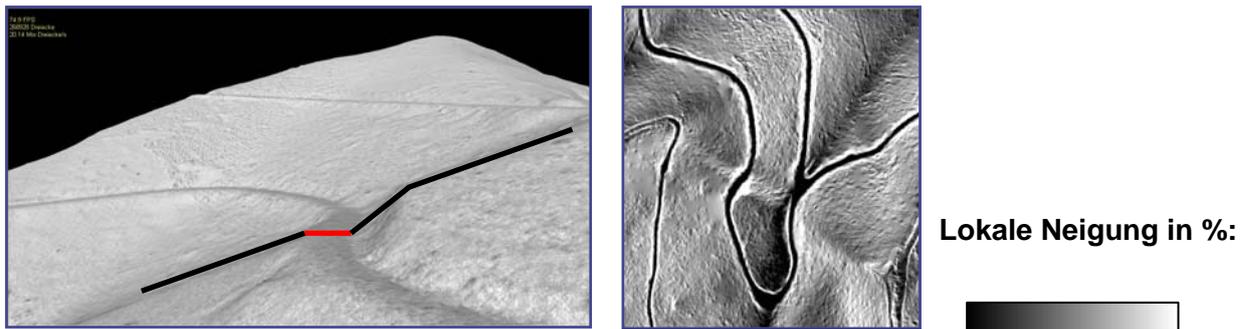


Abbildung 6: Eine Waldstraße bzw. ein Waldweg in einem gebirgigen Gelände, ist eine Fläche die eine signifikant geringere Steigung als ihre Umgebung aufweist. Dies ist in der Regel auf beiden Seiten der Straßen bzw. der Wege der Fall.

Abbildung 7 zeigt ein Beispiel aus einem Mittelgebirgsbereich. Das Gebiet liegt im Schwarzwald nahe Freiburg im Süd-Westen Deutschlands. Der Höhenbereich liegt zwischen 300m über NN bis 1400m über NN. Die gelben Linien in der rechten Abbildung zeigen die automatisch extrahierten Straßen, Wege und teilweise sogar schmale Trampelpfade. Die Extraktion der schmalen Trampelpfade hängt sehr stark davon ab, in welcher Jahreszeit die Laserbefliegung stattgefunden hat und wie dicht die Laserpunkte verteilt sind. Schließlich sind auch die Dichte und der Waldtyp entscheidend für die Qualität des erreichten Ergebnisses. Es kann sogar gesagt werden, dass die beiden zuletzt genannten Aspekte diejenigen sind, die das Ergebnis am meisten beeinflussen.

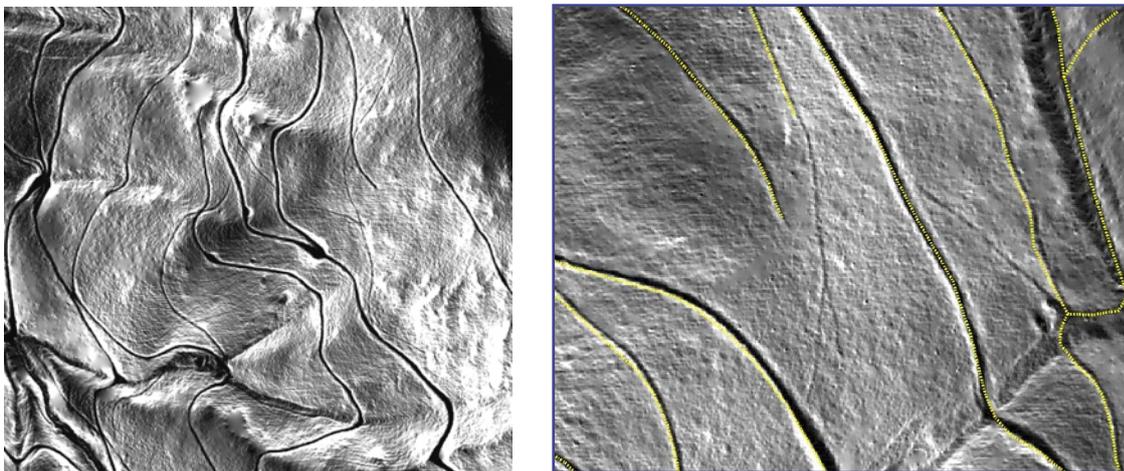


Abbildung 7: Ein Neigungsbild das ein Waldgebiet im Südschwarzwald zeigt (nahe Waldkirch; Kandelgebiet, Höhe bis zu 1400m über NN). Forststraßen, Wege und sogar Trampelpfade sind sichtbar und können automatisch extrahiert werden, wie es die Vergrößerung rechts zeigt.

Eine typische Forststraße, wie wir sie vom Schwarzwald her kennen, ist in Abbildung 8 dargestellt. Die extrahierte Mittellinie (weiße Linie) verdeutlicht, dass der Algorithmus in diesem Fall sehr gut funktioniert.

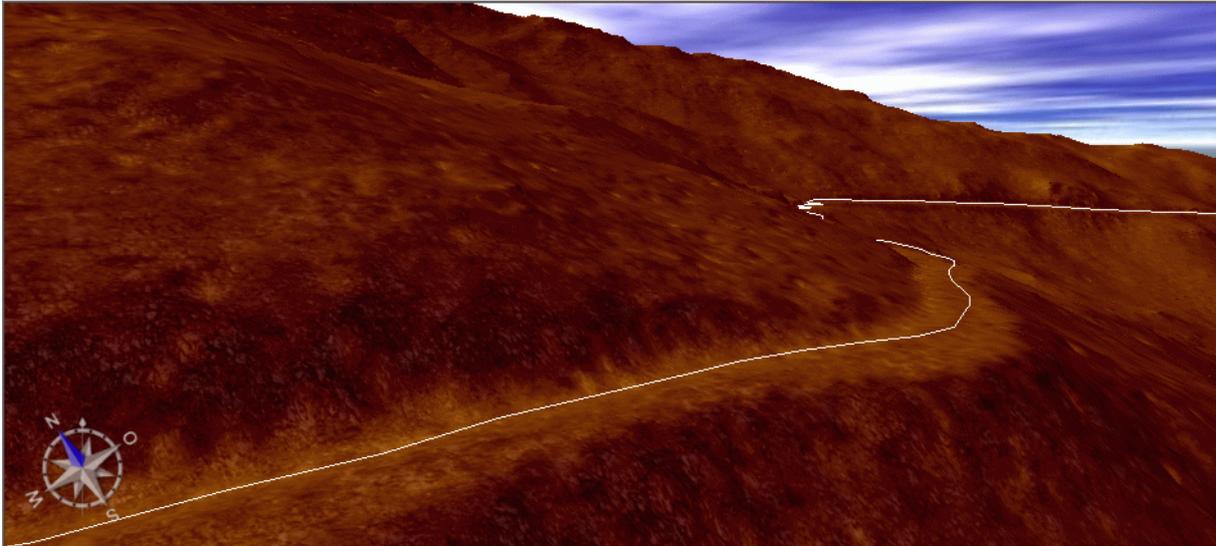


Abbildung 8: In den meisten Fällen ist das Extraktionsergebnis von guter Qualität, so lange die Querschnitte der Waldstrasse die getroffenen Annahmen erfüllen. Dies ist bei der hier gezeigten Waldstrasse der Fall.

In Abbildung 9 werden weitere Ergebnisse erläutert. Im linken Bild der Abbildungen wurden die Waldstrassen in befahrbare (grün) und nicht befahrbare (rot) Teilabschnitte unterteilt. Hierzu wurden die oben aufgeführten Parameter benutzt. Die Klassifizierung geschieht vollautomatisch. Das mittlere Bild zeigt zwei Waldstrassen und die beiden automatisch extrahierten Wegränder (in grün). Schließlich wird in der rechten Abbildung ein Problemfall präsentiert. Die mit roten Linien markierten Wege/Strassen im Offenlandbereich des Waldes konnten in diesem Falle nicht basierend auf dem DGM extrahiert werden. Das Gelände hat zwar eine nicht zu verachtende Neigung, jedoch unterscheidet sich die Neigung des Geländes, das die Straßen umgibt, nur minimal von der Straßenneigung. Damit sind die geforderten Annahmen nicht erfüllt. Die Strassen/Wege konnten erst extrahiert werden, indem zusätzlich Multispektralbilder (B,G,R,IR), für den Erkennungsprozess verwandt wurden. Es wurde ein erster, rudimentärer Algorithmus entwickelt mit dessen Hilfe solche linearen Objekte automatisch extrahiert werden können.

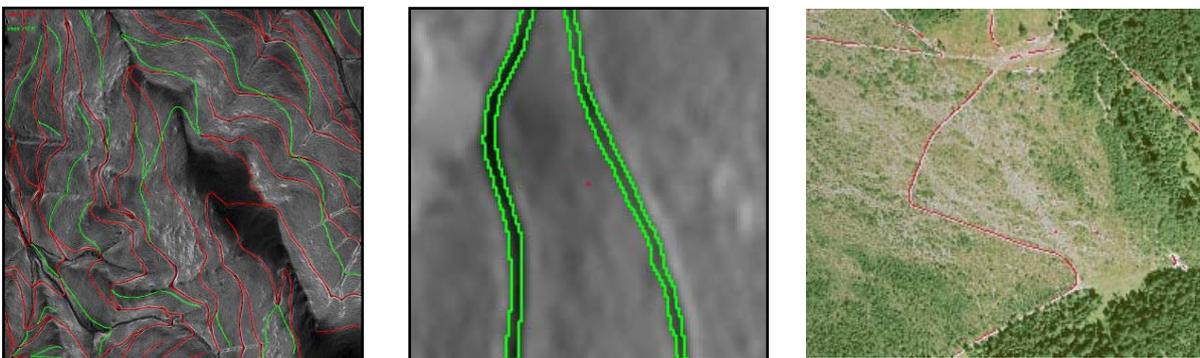


Abbildung 9: Im linken Teilbild werden befahrbare Wege (grün) und nicht befahrbare Wege (rot), die automatisch erkannt und klassifiziert wurden, dargestellt. Die mittlere Abbildung zeigt zwei Straßenabschnitte und die automatisch erkannten Ränder. Im

rechten Teilbild wurde innerhalb eines geeigneten Hanges basierend auf einem RGB Bild ein Weg erkannt, der mit Hilfe des DGM nicht hätte erkannt werden können.

Die automatische Delinierung und Klassifizierung von Waldstrassen ist ein sehr komplexes Aufgabenfeld, das noch sehr viel Forschungsarbeit erfordert. Folgende Bereiche sind noch nicht gelöst: Die Verknüpfung von Teilabschnitten, d.h. im Falle das Straßen nur lückenhaft erkannt wurden und die Verknüpfung von Ergebnissen die auf dem DGM bzw. den Multi-Spektraldaten basieren. Die Integration von zusätzlichem Wissen z.B. zur Aufdeckung von vorhandenen Fehlklassifizierungen. Ein weiterer schwieriger Aufgabenbereich ist die Extraktion von Straßen, die unter Baumbestandenflächen liegen und sich in der Geländeform nicht von der Umgebung unterscheiden. Hier versagt sowohl die Methode die auf dem DGM aufbaut, als auch die Methode die auf den Multispektraldaten basiert. Hier könnte nur die Integration des DOM, die Untersuchung der Laserrohdatenpunkte und die manuelle Unterstützung zu einem zuverlässigen Ergebnis führen. Dies ist auch der Grund wieso wir davon überzeugt sind, das die endgültige Methode immer eine semi-automatische sein wird.

### **2.1.5 Trennung Wald und offene Landschaft und Siedlungsgebieten**

Zur Trennung von Wald, offener Landschaft und Siedlungsgebieten wurden in einem ersten Schritt die Siedlungsgebiete, als auch Straßen und einzelne Man-Made-Objekte extrahiert und aus der Wald-Offenland-Maske entfernt. Dies ist notwendig um im darauf folgenden Bearbeitungsschritt den Wald von der offenen Landschaft trennen zu können.

Um das automatische Waldgrenzenerkennungs- und Delinierungsprogramm entwickeln zu können musste festgelegt werden, was überhaupt unter dem Begriff Wald verstanden wird. Dabei war natürlich insbesondere zu berücksichtigen, was aus den gegebenen Daten überhaupt erkennbar ist. Denn in der Definition des Begriffes „Wald“ fließen auch administrative Faktoren ein, die sich jedoch nicht in den fernerkundlich aufgenommen Daten wieder spiegeln und somit auch keine Berücksichtigung in den entwickelten Methoden finden konnten. Im ersten Schritt wurden eindeutige Parameter festgelegt mit deren Hilfe ein Gebiet der Erdoberfläche als Wald segmentiert und klassifiziert werden kann.

Folgende Parameter wurden festgelegt: die Mindestbaumhöhe soll 1m betragen, die Flächengröße soll mindestens 0,25ha und die durchschnittliche Breite soll mindestens 20m betragen. Der Überschirmungsgrad muss einen Wert von mindestens 50% annehmen. Des weiteren werden auch kahl geschlagene oder verdichtete Grundflächen, die weiterhin forstlich genutzt werden, also Waldwege und Blößen bis max. 0,5ha, als Wald betrachtet. Folgende Flächen werden nicht der Klasse Wald zugeordnet: Gehölzstreifen unter 20m Breite und/oder unter 0,25ha Fläche. Alle diese Parameter können jederzeit geändert werden.

Die Eingabedaten für das neu entwickelte Modul sind ein digitales Oberflächenmodell (DOM), ein normiertes digitales Oberflächenmodell (nDOM) und digitale Orthophotos.

Das Modul wurde in den beiden Testgebieten Kaltenbrunn und Waldkirch getestet. Der Grund dafür ist einfach, neben den unterschiedlichen topographischen Gegebenheiten sind auch die Laserdaten von unterschiedlichen Systemen aufgenommen worden. In Kaltenbrunn stehen nur Laserdaten der Landesvermessung Baden-Württemberg mit einem mittleren Punktabstand von 1.5m zur Verfügung. Dagegen stehen in Waldkirch sowohl diese Daten, als auch die Laserdaten des Full-Waveform Scanners mit einem mittleren Punktabstand von 0,5m zur Verfügung. In den Abbildungen 10 und 11 wird das Ergebnis der Delinierung gezeigt. Es gibt nur sehr geringe Abweichung zwischen der manuellen und der automatischen Abgrenzung. Dagegen zeigt die benötigte Arbeitszeit einen sehr großen zeitlichen Vorteil für das automatische Verfahren. Durch das automatische Verfahren ist ein Zeitgewinn um den Faktor 60-100 möglich.

Ein weiterer Vorteil ist, dass bei der automatischen Methode immer genau definierte Parameter benutzt werden und somit die subjektive Beurteilung durch die unterschiedlichen Bearbeiter wegfällt. Damit ist eine wesentlich bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet.

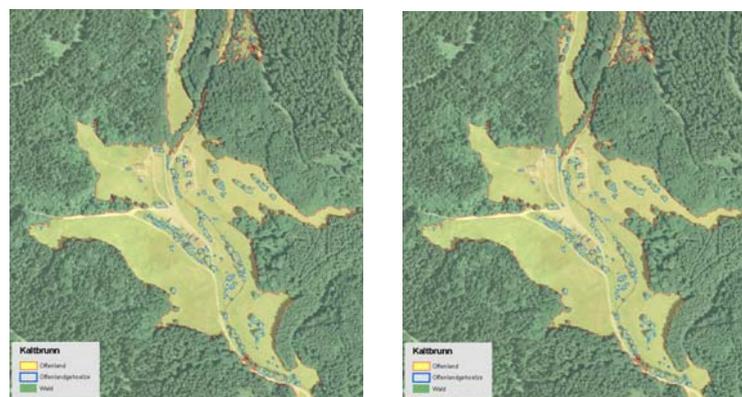


Abbildung 10: a) Automatische Delinierung      b) Manuelle Delinierung  
Gebiet Kaltenbrunn

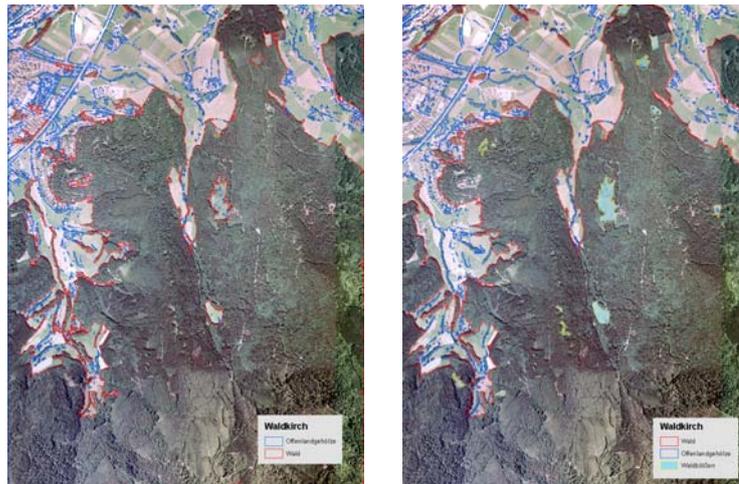


Abbildung 11: a) Automatische Delinierung      b) manuelle Delinierung  
Flächengröße Wald: 861,9ha      Flächengröße Wald: 866,7ha  
Bearbeitungsdauer: 10-15min      Bearbeitungsdauer: 20 Stunden  
Testgebiet: Waldkirch      Testgebiet: Waldkirch

### 2.1.6 Automatische Bestandeseinheitenerkennung

Hierzu wurde ein Softwaremodul entwickelt, das eine Bestandeseinheitenklassifizierung durchführen kann. Es unterteilt das zuvor als Wald erkannte Gebiet, in die Einheiten Nadelwald, Laubwald, Mischwald und Waldboden bzw. niedrige Vegetation. In diesem Fall dienen wiederum das DOM und das nDOM als Eingabedaten. Außerdem werden Bestandeseinheitenklassen in weitere Höhenklassen gruppiert. Kleinere Gebiete werden zusammengefasst, sodass man als Ergebnis eine Karte erhält, die nicht direkt den gebräuchlichen Bestandeskarten gleicht, sondern eine differenzierte Übersicht über die „Bestandeseinheiten“ liefert, siehe Abbildung 12.

- Gebiet: Kaltenbrunn  
Laubwald,  
Nadelwald,  
Mischwald  
und  
weitere Unterteilung  
jeder Klasse in 3 Höhenstufen

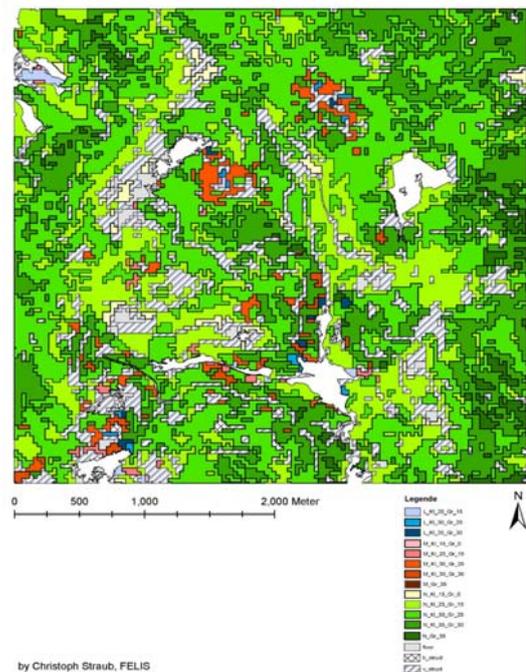


Abbildung 12: zeigt das Ergebnis der automatischen Bestandeseinheitenklassifizierung. Laubbaumbereiche sind in Blautönen, Nadelbaumbereiche in Grüntönen und Mischwald in Rottönen dargestellt. Die unterschiedlichen Tönungen entsprechen Höhenstufen. Des Weiteren werden nicht überdeckte Bodenbereiche in Grau dargestellt. Horizontal stark strukturierte Waldbereiche wurden mit Kreuzmuster und vertikal strukturierte Bereiche mit einem Parallelmuster gekennzeichnet. Dadurch ist bereits eine sehr detaillierte, aussagekräftige Unterteilung des Waldgebietes erreicht worden

Mit Hilfe dieses Moduls können bereits mehrere forstliche Parameter, die für die Stakeholder bzw. die Forstverwaltung von Nutzen sind, extrahiert werden.

### 2.1.7 Ableitung von zusätzlichen forstlichen Parametern

Um zusätzliche Parameter ableiten und insbesondere prüfen zu können, bedienen wir uns der Informationen aus Betriebsinventurpunkten im Testgebiet. Um dies tun zu können, musste das Programm so erweitert werden, dass man die Betriebsinventurpunkte genau positionieren, als auch ihre genaue Form ins Programm übernehmen kann. Die Form ist wichtig, da diese Punkte nicht immer Vollkreise sind, sondern oftmals nur Kreissegmente. Die Integration und Visualisierung dieser Punkte zeigt Abb. 13. Die Höhe dieser Zylinder entspricht der höchsten Baumhöhe innerhalb der ausgewählten Fläche.

Basierend auf diesen Vorarbeiten ist dann ein korrektes Ausschneiden von Rohdaten möglich. Mit den Rohdaten werden daran anschließend mehrere forstlich relevante Parameter berechnet. Die berechneten Parameter werden in der weiteren Projektarbeit mit den identischen Parametern, die bei der manuellen Inventur aufgenommen wurden, verglichen.

Basierend auf diesen Auswertungen werden dann die Routinen korrigiert und erweitert. Abb. 14 zeigt das Ergebnis der automatischen Parameterableitung.

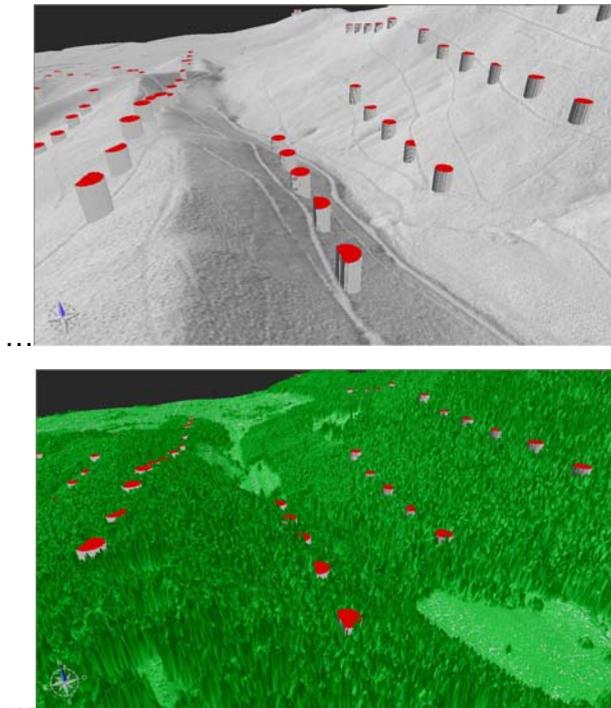


Abbildung 13: Betriebsinventurpunkte (BI-Pkte) integriert ins Programmsystem TreesVis. Dabei wird explizit die genaue Form der BI-Punkte berücksichtigt.

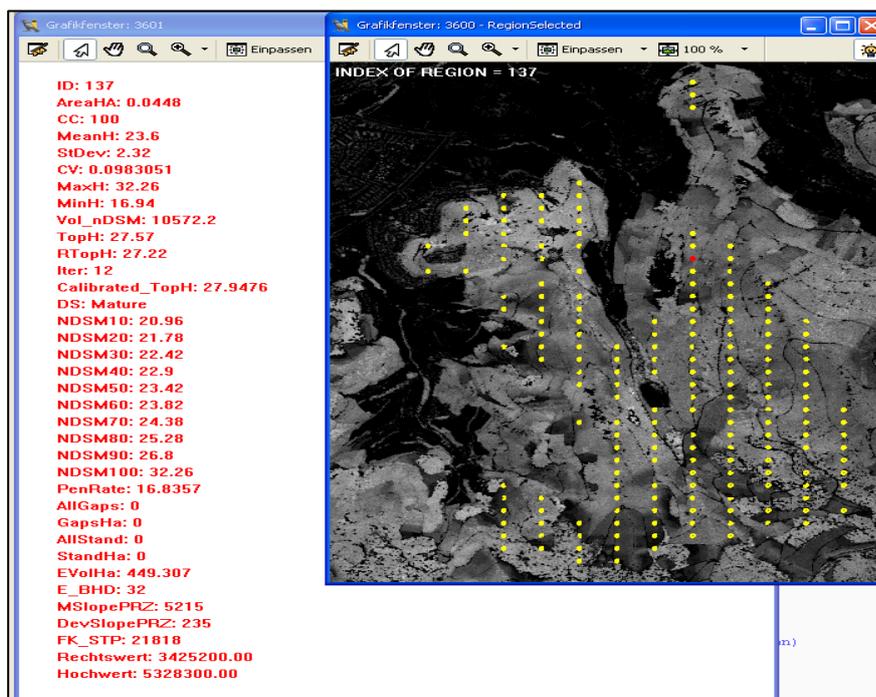


Abbildung 14: Automatisch abgeleitete forstliche Parameter an Betriebsinventurpunkten im Testgebiet Waldkirch. Werte sind z.B. mittlere Baumhöhe, Lücken, Schichthöhen etc.

### 2.1.8 3-D Extraktion/Modellierung von Einzelbäumen

Die erste Aufgabenstellung bestand darin, aus den Laserrohdaten abzuleiten, ob das zu untersuchende Gebiet mit einem einschichtigen oder einem mehrschichtigen Bestand bewachsen ist. Hierzu wurde das Untersuchungsgebiet in ein Raster von z.B. 20m Seitenlänge unterteilt (siehe Abb. 15a). Abbildung 15b zeigt das Ergebnis des nächsten Schrittes, hier wurden die Rohdatenpunkte selbst auf die DTM Oberfläche höhenmäßig normiert. Das bedeutet, der Höhenwert jedes einzelnen 3D Laserpunktes entspricht dessen Höhe über dem Boden.

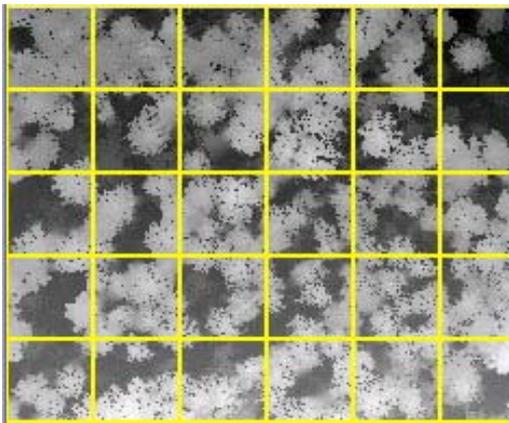
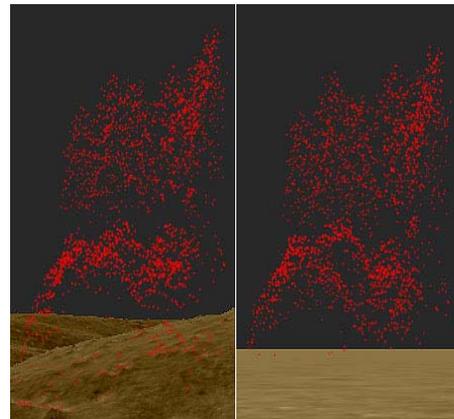


Abbildung 15: a) 20m\*20m Gitter



b): Punkte über NN-Fläche

Innerhalb jeder Kachel wird ein Höhenhistogramm der Punkte berechnet. Im Fall, dass zwei Höhengschichten existieren, können zwei Maxima auftreten. Es müssen jedoch zwei Fälle untersucht werden. Im ersten Fall sind zwei Gruppen von Bäumen vorhanden, die nebeneinander stehen und unterschiedliche Höhen haben. Im zweiten Fall sind es wirklich zwei Schichten, die an derselben Position stehen (siehe Abbildung 16). An Hand des Histogramm können diese beiden Fälle nicht unterschieden werden.

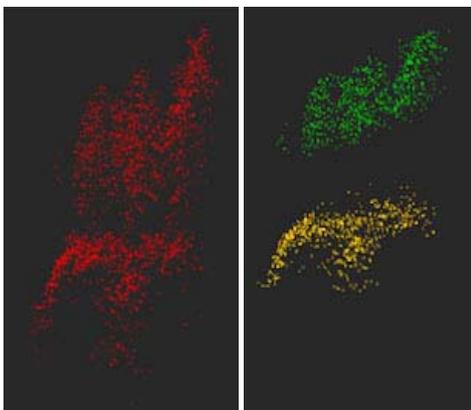
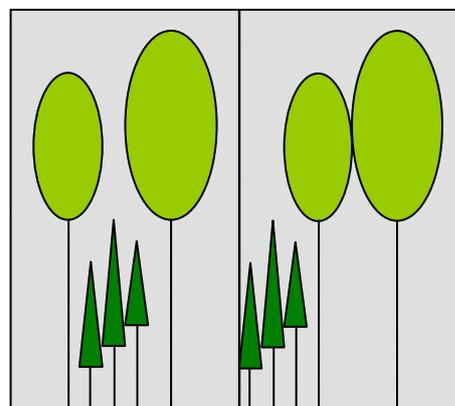


Abbildung 16: a) Rohdaten in zwei



b) Zweischichtiger Bestand

Höhenklassen gruppiert

und zwei Bestände nebeneinander

Aus diesem Grund wird in einem zweiten Verfahrensschritt untersucht, ob wirklich mehrere Schichten vorhanden sind. Dazu wird der Bestand in Höhengschichten unterteilt und dann wird untersucht, ob Gebiete auftreten die sich überlappen (siehe Abb. 17). Dies sind dann Bereiche mit zwei oder mehreren Schichten.

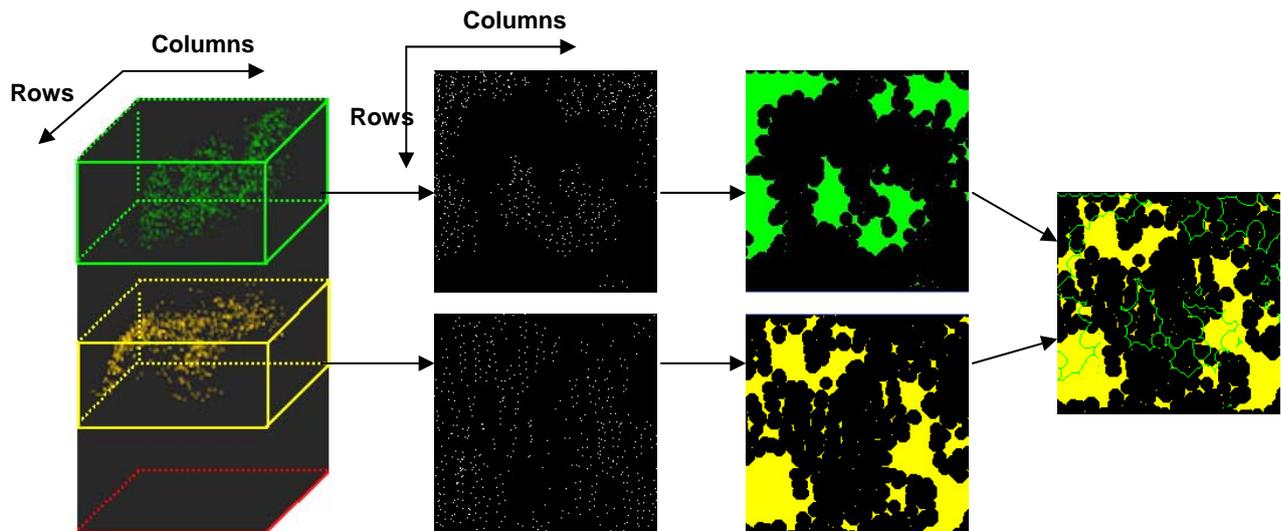


Abbildung 17: Erkennung von sich überlappenden Höhengschichtenbereichen. Ist dies der Fall befindet sich in dem zu untersuchenden Bereich ein mindestens zweischichtiger Bestand

- **3D Einzelbaumdelineierung:** Hierzu wird das zu untersuchende Gebiet in Kacheln unterteilt deren Ausdehnung in gewissen Grenzen frei gewählt werden kann. Die maximale Seitengröße einer Kachel beträgt 500m, d.h. eine Kachel deckt maximal 25ha Waldfläche ab. Zur Delineierung wird nicht mehr vom digitalen Oberflächenmodell (DOM) ausgegangen, sondern direkt vom 3D Punkthaufen. Die Vorteile der 3D Auswertung gegenüber dem 2D basierten Verfahren sind:

- das der Algorithmus robuster bezüglich Bäumen in verschiedenen Höhen ist,
- das die 3D Form der Baumkronen und weitere nützliche Parameter wie Kronenvolumen, Kronenbereich etc. abgeleitet werden können.

Ausgehend von den normierten Rohdatenpunkten werden Voxel (Volume x Element) und Schichtenbilder gebildet, siehe Abbildung 18.

Jede Schicht setzt sich aus Voxel zusammen, deren Größe wiederum frei wählbar ist. Die Anzahl der 3D-Punkte, die in jedem Voxel zu liegen kommen, wird im entsprechenden Pixel in dem dazugehörigen Schichtenbild, gespeichert. Ausgehend vom höchsten Schichtenbild werden die Baumspitzen gesucht. Diese Bäume werden in der jeweils darunter liegenden

Ebene verfolgt. Gibt es nur noch leere Pixel, dann ist damit das Ende einer Krone erreicht. Tauchen an einer neuen Stelle in einem Schichtenbild wieder neue belegte Pixel auf, so werden diese als neuer Baum interpretiert und verfolgt. Der Prozess wird solange verfolgt, bis eine minimale Höhe erreicht wird, z.B. zwei Meter über dem Boden. Abbildung 18 erläutert den Prozess grafisch. Abbildung 19 zeigt einen „gevoxelten“ Baum und wichtige daraus abgeleitete Baumparameter.

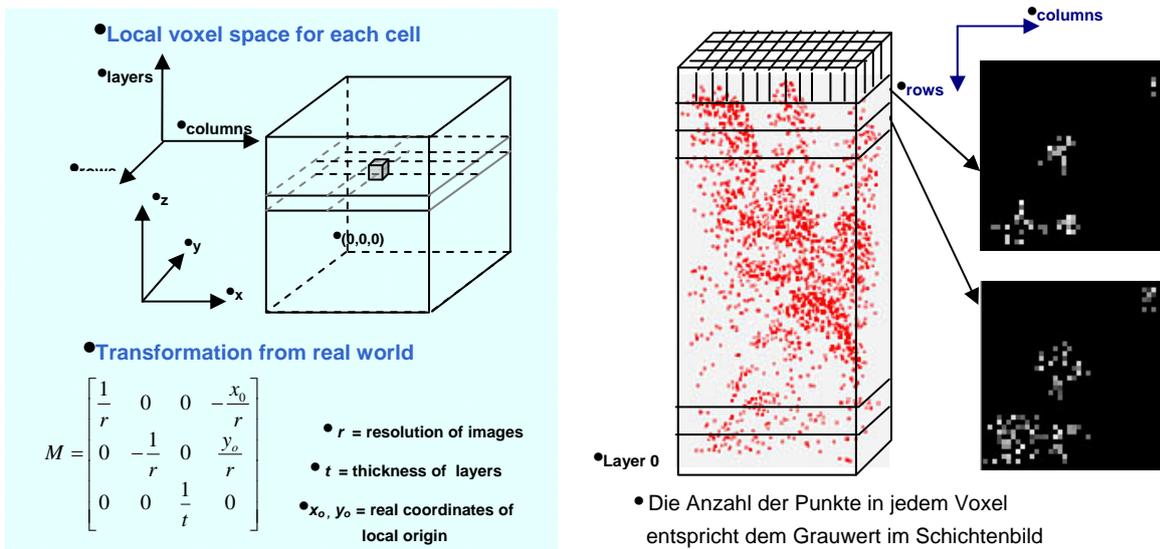


Abbildung 18: Darstellung der Voxel-Bildung und Baumkronensuche basierend auf 3D Laserpunkten.

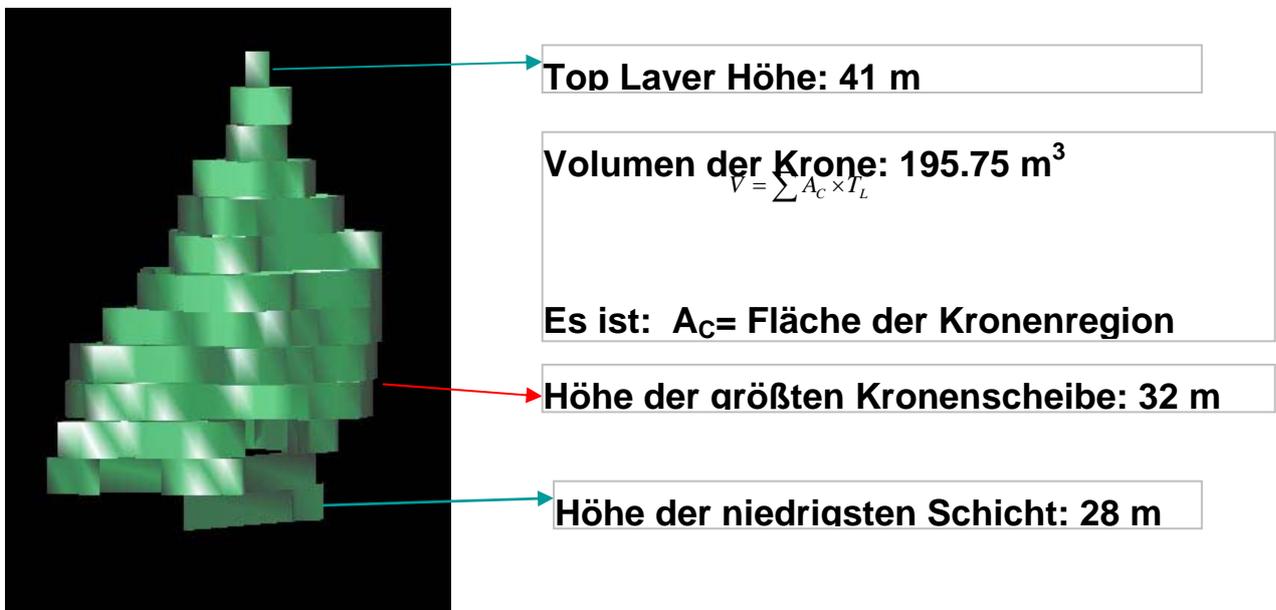


Abbildung 19: Ein gevoxeltes Baummodell erzeugt aus der 3D Einzelbaumdelineierung basierend auf Laserrohdaten und daraus abgeleitete Parameter.

Der 3D-Einzelbaum-Delinierungsalgorithmus muss noch erweitert werden, z.B. müssen auch solche Bäume erkannt werden, die am Rand einer jeweils untersuchten Kachel liegen. Es treten teilweise „Überaufteilungen“ an den Rändern der Kacheln auf, auch diese Effekte wurden noch nicht berücksichtigt. Ebenfalls kann, insbesondere bei sehr großen Bäumen, eine nicht gewollte Aufteilung in mehrere Bäume auftreten. Und schließlich müssen noch verbesserte Kriterien zur Erkennung der Baumspitzen eingeführt werden, wie z.B. vertikaler und horizontaler Abstand zwischen zwei Baumspitzen, Formparameter usw. Außerdem können jetzt die terrestrischen Laserdaten mit den flugzeuggetragenen verknüpft werden. Damit ist die Möglichkeit geschaffen worden, komplette Baummodelle zu modellieren [d.h. der untere Teil des Baums basiert dann auf den terrestrischen (TLS) Laserdaten und der obere aus den flugzeuggetragenen (ALS) Daten]. Diese Modelle können dann in weiteren Untersuchungen dazu benutzt werden, neue Baumwachstumsmodelle zu entwickeln. Die Verknüpfung von ALS und TLS Daten wird im nächsten Abschnitt näher beleuchtet.

### **2.1.9 Integration von terrestrischen Laserdaten ins Softwaresystem TreesVis**

Die ALS Daten werden in Blöcken gruppiert. Die Größe der Blöcke ist frei wählbar, wobei jedoch ein Defaultwert von 32m\*32m als Standardwert vorgeschlagen wird, der sich bei Laserdaten mit einem Punktabstand von 0.25m bis 1.5m bewährt hat. Die Säulen haben eine vertikale Ausdehnung, die der Differenz des kleinsten und des größten Höhenwertes der Laserspots entsprechen die in der jeweiligen Säule liegen. Diese Art der Gruppierung wird in Abbildung 20 gezeigt.

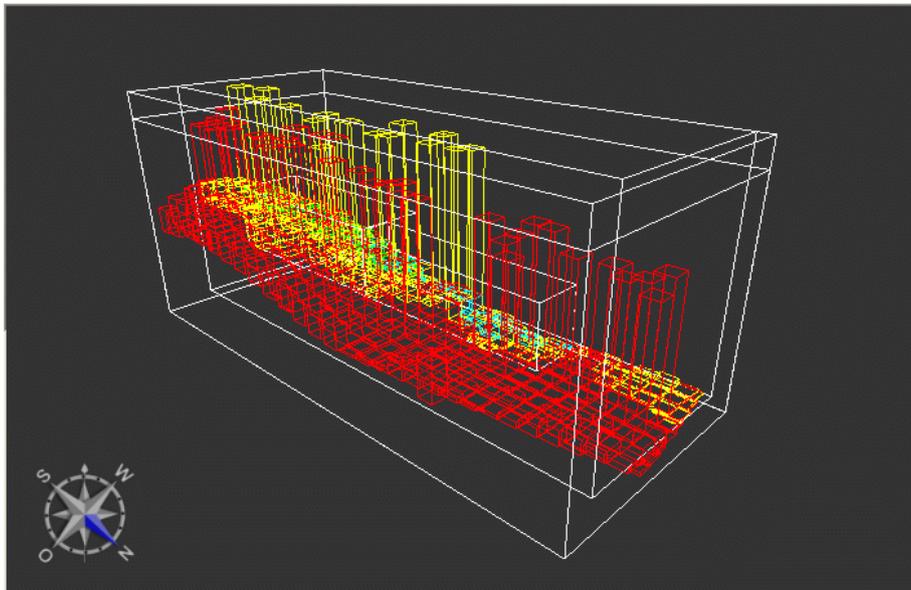


Abbildung 20: Darstellung der Speicherung von ALS Daten. Das mit Rohdaten abgedeckte Gebiet wird in quadratische Säulen mit einer frei wählbaren Seitenlänge unterteilt. Jede Säule repräsentiert einen Block von Rohdaten, die separat im Speicher abgelegt werden.

In Abbildung 21 wird die implementierte Gruppierung der TLS Daten dargestellt. TLS Daten sind sehr ungleichmäßig verteilt (sphärisch), deshalb werden sie in 3D-Quadern mit frei wählbarer Seitenlänge in einem besonderen binären Format gespeichert. Dies ist notwendig um eine 3D-Visualisierung in Echtzeit gewährleisten zu können.

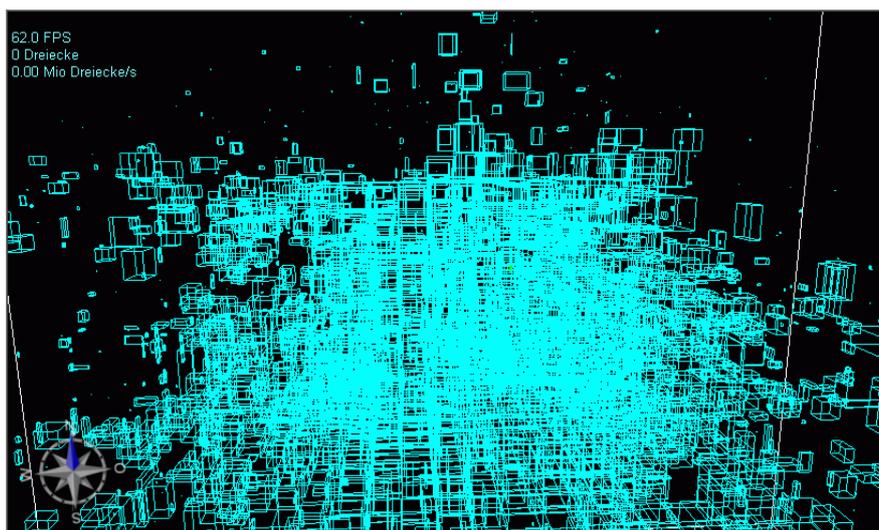


Abbildung 21: Darstellung der Speicherung von terrestrischen Laserdaten (TLS). TLS Daten sind sehr ungleichmäßig verteilt (sphärisch), deshalb werden sie in 3D-Quadern mit frei wählbarer Seitenlänge in einem besonderen binären Format gespeichert. Dies ist notwendig um eine 3D-Visualisierung in Echtzeit gewährleisten zu können.

Es ist deutlich sichtbar wie die Dichte der 3D-Quader mit wachsendem Abstand zum Aufnahmezentrum abnehmen. Außerdem nimmt auch die Besetzung der Quader mit Laserspots selbst mit größer werdender Entfernung ab. Die Verknüpfung, realisiert durch die Georeferenzierung der TLS Daten, wird mit Hilfe des Fensters das in Abbildung 22 gezeigt ist, durchgeführt. Der aktuell implementierte Georeferenzierungsprozess ist ein 2-stufiges Verfahren und wird mit Hilfe von Referenzkugeln durchgeführt.

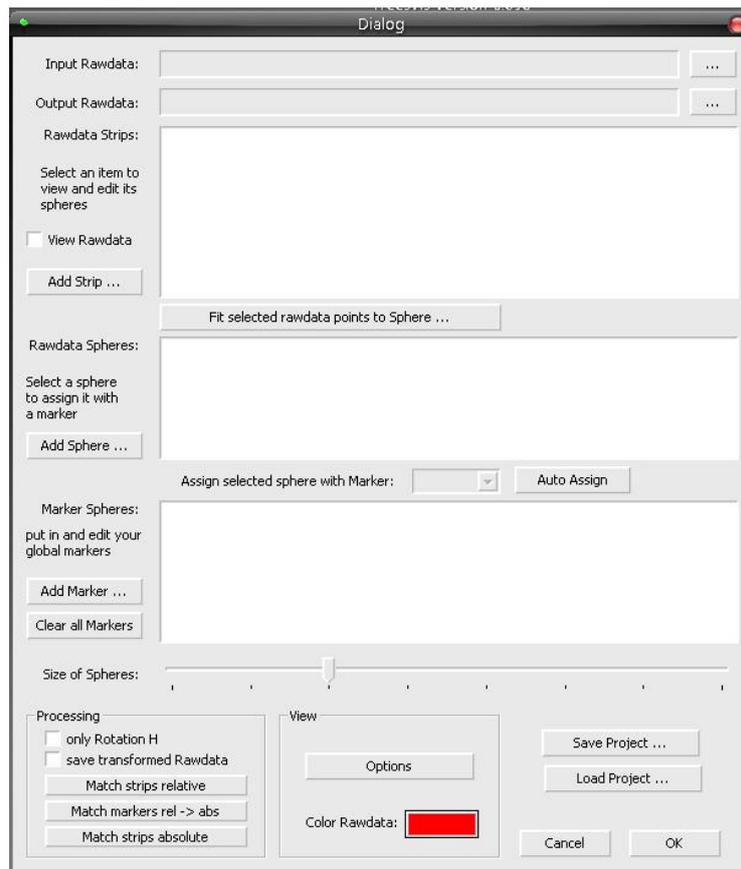


Abbildung 22: Kopie des Bearbeitungsfensters für die Georeferenzierung der TLS Daten im Programmpaket TreesVis.

In der ersten Stufe werden die Laserdaten der unterschiedlichen terrestrischen Scans in ein frei gewähltes Scansystems transformiert. Dazu müssen in jedem Scan drei identische Kugeln sichtbar sein. Danach liegen alle Laserspots in einem lokalen Koordinatensystem, dies zeigt Abbildung 23. In dieser Abbildung werden die Laserdaten von 3 Scans visualisiert. Mit Hilfe von mindestens 3 Referenzkugeln, d.h. Kugeln deren Koordinaten auch im übergeordneten Koordinatensystem gegeben sind, wird eine 3D Ähnlichkeitstransformation berechnet. Danach besitzen alle Laserspots Koordinaten im Referenzsystem. Jetzt ist es möglich sowohl die terrestrischen als auch die flugzeuggetragenen Laserdaten simultan in Echtzeit zu visualisieren, siehe Abbildung 24.

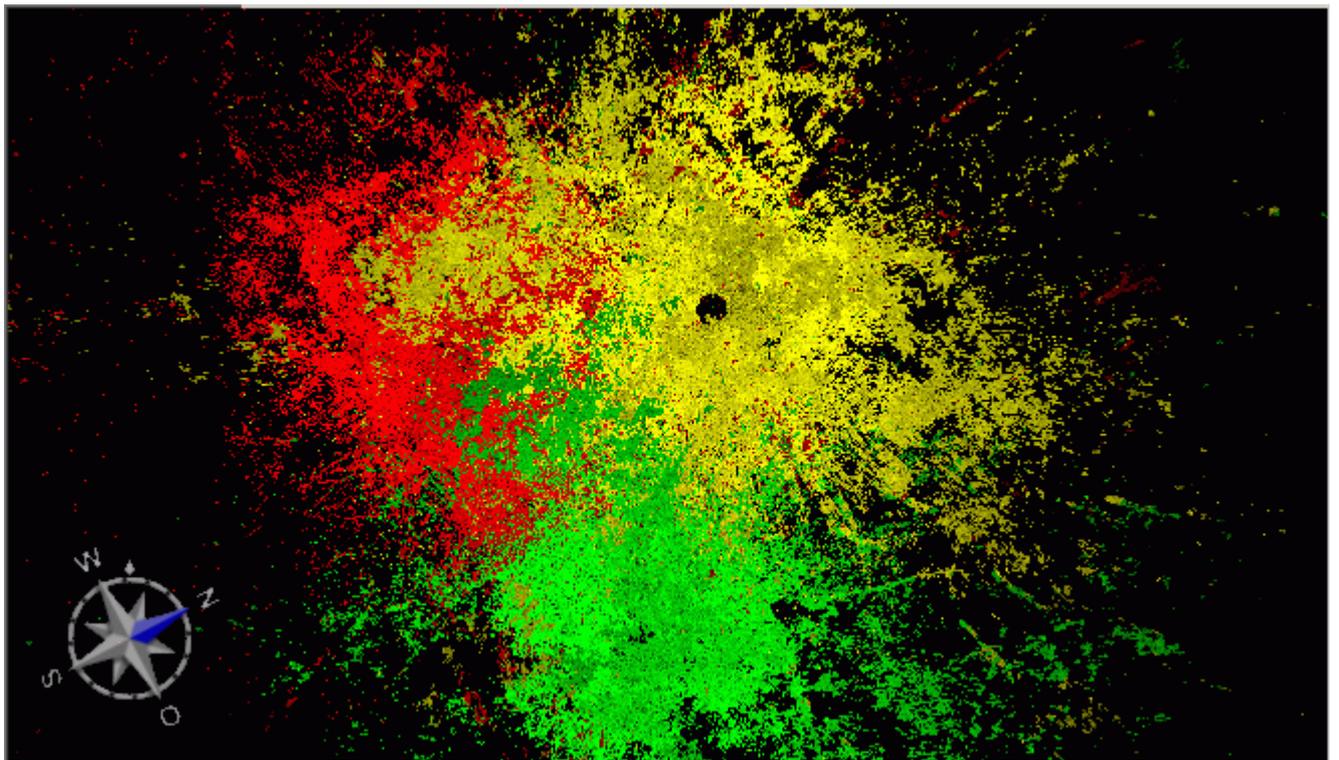


Abbildung 23: Georeferenzierte TLS Daten. Die Abbildung zeigt Laserspots die von drei terrestrischen Laseraufnahmen stammen. Die Daten sind sowohl relativ als auch absolut orientiert, d.h. sie liegen nach den Transformationen im geodätischen Lage- und Höhensystem vor und können jetzt simultan mit den ALS Daten im TreesVis Programm visualisiert und in weiteren Bearbeitungsschritten verwendet werden.

Durch die Entwicklung dieses Moduls wird es möglich komplette und sehr detaillierte 3D-Baummodelle zu erzeugen. In der Vergangenheit wurden entweder die terrestrischen Laserdaten genutzt um Einzelbaummodelle zu erzeugen. Dort fehlten jedoch die Informationen aus den oberen Bereichen der Krone. Im Gegensatz dazu fehlten bei den Modellen, die aus den flugzeuggetragenen Laserdaten abgeleitet wurden, detaillierte Informationen aus den unteren Bereichen der Bäume. Dieses Manko ist durch die Kombination beseitigt.



Abbildung 24: Simultane Visualisierung der ALS (rot) und der TLS (grau) Daten im Verarbeitungsprogramm. Die Grauwerte bei der Visualisierung der TLS Daten entsprechen deren Intensitätswerten. Da bei den hier gezeigten ALS Daten keine Intensitätswerte gegeben waren, haben diese alle denselben Rot-Wert. Falls hier ebenfalls Intensitätsdaten vorliegen, können auch diese visualisiert werden.

### **2.1.10 Integration bzw. Entwicklung aller Module ins Softwaresystem TreesVis**

Die entwickelten Module wurden auch deshalb ins Softwaresystem TreesVis integriert, weil dadurch die wirtschaftlichen Erfolgsaussichten steigen, denn ein System das mehrere Tools mit einer einfach zu bedienenden Benutzeroberfläche enthält ist für potenzielle Nutzer immer interessanter als ein rudimentäres System, das aus einem Forschungsprojekt heraus entwickelt wurde. Außerdem ist ein solches System auch sehr nützlich beim Testen und Validieren von neuen Methoden, die z.B. in weiteren Forschungsprojekten entwickelt werden.

## **2.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans**

Die im Projekt gewonnenen Ergebnisse haben unserer Ansicht nach ein großes Potenzial, sowohl in wirtschaftlicher als auch in wissenschaftlichen/technischen Hinsicht. Die Möglichkeit detaillierte Informationen z.B. über Waldstrassen semi-automatisch ableiten zu können, ist von wirtschaftlichem Interesse für die staatliche als auch die private Forstwirtschaft. Ebenfalls sind die Berechnung von forstlich relevanten Parametern und die automatische Abgrenzung von Wald, basierend auf einer präzise beschriebenen Walddefinition, von wirtschaft-

lichem Vorteil. Dies gilt insbesondere im Hinblick auf den erreichbaren Zeitgewinn, bei praktisch identischem bzw. sogar genauerem, zuverlässigerem und reproduzierbaren Resultaten.

Die entwickelten Methoden können als Ausgangspunkt für Entwicklungen in weiten Bereichen eingesetzt werden, z.B. ist die Waldwege- und Straßenerkennung auch für den Bereich Landschaftspflege, Tourismus etc. von Bedeutung. Die Trennung von Vegetations- und Nichtvegetationsflächen kann in den Bereichen Landes- und Stadtplanung von Interesse sein. Denn in diesen Bereichen ist die Erkennung von Man-Made-Objekten (z.B. Gebäuden) eine Voraussetzung zur korrekten Modellierung derselben.

Dadurch dass alle entwickelten Methoden im Softwaresystem TreesVis integriert wurden und werden, steht der Abteilung FeLis ein mächtiges Tool zur Verfügung, das sowohl in praktischen Anwendungen als auch für weitere Forschungen im Bereich der 3D Informationsextraktion und dort insbesondere bei der Extraktion von Informationen aus 3D-Punkten eingesetzt werden kann. Hierbei spielt es keine Rolle, woher die 3D-Punktinformation stammt. Diese Daten können sowohl aus der Auswertung von Stereobildern (Satellitenszenen oder Luftbildern) oder auch aus Prozessen, die auf RADAR Daten basieren, stammen.

### **2.3 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen**

Da in diesem Teilprojekt viele unterschiedlichen Forschungsbereiche, wie z.B. digitale Bildverarbeitung, „Computer Vision“, 3D Computer Grafik, Fernerkundung, Waldwachstumslehre, Biometrie, Lidar-Sensortechnologie etc. berührt wurden, kann man keine globale Aussage über Fortschritte, die an anderen Stellen gewonnen wurden, geben. Sondern man muss jeden Bereich separat beleuchten. Deshalb wird hier für jeden Bereich ein kurzer Blick, auf die unserer Ansicht nach relevantesten Arbeiten die an anderen Institutionen entwickelt wurden, gegeben. An Hand dieser Artikel kann der Leser sich einen vertieften Überblick verschaffen. Insbesondere möchten wir an dieser Stelle auch auf das im November 2008 erschienene Buch: „Topographic Laser Ranging And Scanning“, herausgegeben von J.Shan und C.K.Toth hinweisen. Es ist das erste Buch, das nicht nur die Prinzipien und Verarbeitungsschritte von Laserdaten im Bereich der Extraktion von Informationen über topographische Objekte erläutert, sondern auch einen Überblick des Forschungsstandes in fast allen in diesem Teilprojekt angeschnittenen Fragestellungen, gibt.

Speziell im Bereich der Entwicklung von **DOM/DGM** sind viele Institutionen tätig, da ein genaues und zuverlässiges Geländemodell bzw. Oberflächenmodell die Basis für praktisch alle weiteren Entwicklungen in den verschiedensten Anwendungsgebieten, sei es die Landesvermessung, der Hydrologie, die Städteplanung etc., ist. Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der Universität Wien wurde in diesem Gebiet die Entwicklung ebenfalls

vorangetrieben. Basierend auf der Arbeit von Briese (2004) hat Mandlbauer (2006) den Bruckkantenalgorithmus erweitert. Außerdem konnten Doneus u. Briese (2006) mit Hilfe der zusätzlichen Informationen die man aus Full-Waveform Lidardaten erhält, eine bessere Filterung der Rohdatenpunkte erreichen, was zu einer verbesserten Klassifizierung der Bodenpunkte führt und dies wiederum zu einem zuverlässigerem DGM, da weniger Fehlpunkte in den als Bodenpunkten klassifizierten Punktwolke enthalten sind.

Im Forschungsbereich der **semi-automatischen Waldstrassenerkennung** sind uns keine Forschungen bekannt. Verfahren zur automatischen Strassenerkennung beziehen sich alle auf Gebiete, die im Offenland bzw. in Stadtbereichen, liegen. Außerdem wurden meistens Multispektraldaten ausgewertet. Artikel die erste Extraktionsergebnisse, die auf der Nutzung von Lidar basieren, zeigen sind folgende - Hu et al (2004) und Clode et al (2007). In keinem uns bekannten Fall wurden jedoch Methoden entwickelt bei denen Waldstrassen, die natürlich innerhalb von Waldbereichen liegen, extrahiert wurden.

Grundlegende Arbeiten im Bereich der Verarbeitung von **Full-Waveform** Laserdaten wurden von Bretar (2006), Jutzi (2006), Wagner (2006), Wagner (2008b) und Mallet et al. (2008) präsentiert. In diesen Arbeiten hatten zum Ziel ein besseres Verständnis der physikalischen Eigenschaften zu erhalten,

Das Interesse in der Entwicklung von Methoden zur Extraktion und Modellierung von **Einzelbäumen** ist gerade in den letzten drei Jahren sehr gestiegen, was auch sicherlich mit der zunehmenden Verfügbarkeit von dichteren Multi-Pulse und Full-Waveform Laserdaten zu tun hat. In diesem Forschungsbereich sind mehrere Institutionen tätig. Relevante Forschungsergebnisse speziell in Relation zu Full-Waveform Laserdaten lieferten Reitberger et al. (2007), Reitberger et al. (2008a), Reitberger et al. (2008b),

Im Bereich der **Trennung von Wald und Nichtwald** fanden in den letzten Jahren weniger Aktivitäten statt. Hier ist insbesondere die Arbeit von Wang Z. (2007) zu nennen. Die Autoren stellen ein Verfahren vor, das auf der kombinierten Auswertung von Lidar und Multispektraldaten basiert. Das Verfahren basiert auf dem so genannten JSEG (Deng, 2001) Algorithmus und der Integration von Texturinformationen die mittels Gabor Wavelet Transformationen extrahiert wurden. Weitere Forschungen und Ergebnisse sind uns nicht bekannt.

Ergebnisse zur **Ableitung von Bestandesattributen** findet man z.B. in Hollaus et al. (2007) und Maltamo et al. (2006). Bei dem erstgenannten Artikel basiert das Ergebnis auf einer multiplen Regressionsanalyse und bei dem zweiten Artikel auf eine spezielle Version der k-NN Methode, nämlich der k-MSN Methode. Gross et al. (2007) zeigt basierend auf Full-Waveform Lidardaten, die Trennung von Vegetation und Nicht-Vegetation (hier Gebäude) und Laub-/Nadelbäume, dies allerdings nur in Stadtbereichen. Auch in Wagner (2008a)

werden Vegetationsgebiete mit Hilfe der zusätzlichen Informationen, die man aus den Full-Waveform Daten gewinnen kann, extrahiert.

Auf dem Gebiet der **3D Echtzeitvisualisierung** finden insbesondere in den Computer Grafik Instituten viele Entwicklungen statt. Hier sollten speziell die Entwicklungen die im Hasso Plattner Institut (Prof. Jürgen Döllner) durchgeführt wurden, genannt werden. Das Programm Landexplorer, das als Produkt der Forschung entstand, wurde von der Firma Geo3D vertrieben, die vor kurzem von Autodesk aufgekauft wurden. Was zeigt, das an diesen Entwicklungen ein reges wirtschaftliches Interesse herrscht. Das Ziel dieses Produktes war und ist jedoch eher die Modellierung und Visualisierung von 3D-Stadtmodellen. Der Schwerpunkt in unserem Projekt liegt mehr auf der Bearbeitung und simultanen Visualisierung von ALS und TLS Daten und den daraus abgeleiteten forstlichen Parametern.

## **2.4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

In TP1 wurden und werden veröffentlicht (Artikel, schriftliche Tagungsbeiträge, Vorträge):

BALIC et al. 2007, Koch et al. 2006, Koch 2007, Koch et al. 2009a, Koch et al. 2009b, STRAUB et al. 2006, Wang et al. 2007, Wang et al. 2008a, Wang et al. 2008b

## **3 Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht**

### **3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms**

In diesem Teilprojekt wurden automatische und semi-automatische Methoden entwickelt, die aus unterschiedlichen Laser- und Multispektraldaten, d.h. fernerkundlich aufgenommen Daten, Waldinformationen für größere Bereiche zum weiteren Nutzen in der „Forst-Holz-Kette“ zur Verfügung stellen.

Dieser Teil des Gesamtprojektes stellt somit alle Daten zur Verfügung, die notwendig sind um in den daran anschließenden Teilen der Prozesskette „vom Baum zum Produkt“ weiter arbeiten zu können. Damit liefern die implementierten Methoden einen wesentlichen Beitrag für die „Erschließung von Wertschöpfungspotenzialen“ entlang der Prozessierungskette. Da das Teilprojekt wiederum ein Teilprojekt im Verbundprojekt „Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung“, ist konnten die aufgestellten förderpolitischen Ziele erreicht werden.

### 3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen

- **Nutzung von Full-Waveform Laserdaten:** Methoden zur Auswertung von **Full-Waveform Laserdaten** wurden entwickelt und implementiert. Das bereits vorhandene Rohdatenformat wurde so erweitert, dass alle Informationen die aus den Full-Waveform Daten abgeleitet wurden, übernommen werden können und somit weiteren Verarbeitungsroutine zur Verfügung stehen. Diese Parameter sind die Amplitude des zurückgesandten Pulses, die Pulsweite, die Pulsintensität, die Pulsnummer im Strahl, die komplette Anzahl von Pulsen und falls vorhanden auch Informationen über den Laserstrahl selbst, wie das Ausgangssignal bzw. den 3D-Richtungsvektors des Strahls.
- **Berechnung von DOM/DGM für sehr große Gebiete:** Zum einen wurde dieses Softwaremodul so erweitert, dass die Berechnung ebenfalls für die in diesem Projekt zur Verfügung stehenden Laserdaten zuverlässige und genaue Höhenmodelle liefert. Zusätzlich wurde das Modul so erweitert, dass es ebenfalls für sehr große Projektgebiete eingesetzt werden kann, da solche Gebiete in beliebige Kacheln unterteilt werden können. Des Weiteren wurden Vorarbeiten für die automatische **Bruchkantenerkennung** entwickelt und implementiert. Hierzu zählt auch die Einführung eines neuen Rohdatenformates (siehe auch Full-Waveform Datenprozessierung und die TLS Datenintegration).
- **Verknüpfung von ALS und TLS Daten:** Erweiterung des binären **Datenformates** im Berechnungsmodul TreesVis zur Integration und simultanen Visualisierung der ALS und TLS Daten. Entwicklung und Implementierung eines Moduls zur **Georeferenzierung** der terrestrischen Laserdaten (TLS), sowohl von Einzelscans als auch von Mehrfachscans, in die übergeordneten geodätischen Referenzsysteme - Lage- und Höhe. Die Verknüpfung der Ergebnisse der beiden unterschiedlichen Messmethoden ist somit realisiert. Dadurch ist es z.B. möglich in weiteren Forschungsprojekten komplette und sehr detaillierte Baummodelle abzuleiten. Dies wäre mit der separaten Auswertung der terrestrischen bzw. den flugzeuggetragenen Laserdaten nicht möglich.
- **Semi-automatische Waldwege-Erkennung:** In Gebieten die ein gewisses Gefälle besitzen, können damit sowohl Waldwege als auch Waldstrassen extrahiert werden. Bei den Waldstrassen können zuverlässig neben der Wegbreite, der Steigung auch Kurvenradien und der Lichtraum aus den Laserdaten abgeleitet werden. Diese Informationen sind notwendig für die **Ermittlung** von Abfahrtsplänen des geschlagenen Holzes und konnten mit den derzeit zur Verfügung stehenden Verfahren nicht oder nur mit einem enormen zeitlichen und finanziellen Aufwand erhoben werden.

- **Trennung von Wald/Nichtwald (Offenland/Siedlung):** In einem ersten Schritt werden Vegetationsflächen von Nicht-Vegetationsflächen getrennt. Daran anschließend erfolgt die Unterteilung in Wald- und Nichtwaldflächen. Beide Verfahren laufen voll-automatisch ab. Die Definition Wald (Festlegung von Parametern) kann/muß vom Anwender festgelegt werden. Das Programm liefert fast identische Ergebnisse im Vergleich zu einer manuellen Trennung, ist aber cirka um den Faktor 100 schneller. Dies hängt von der Form, der Struktur und der Größe des zu extrahierenden Waldes und den zur Verfügung stehenden Laserdaten ab.
- **Automatische Bestandesdelinierung:** Es erfolgt eine Trennung in Laub-, Nadel und Mischbaumeinheiten. Die Bestandeseinheiten werden zusätzlich in unterschiedliche, frei wählbare Höhenstufen gruppiert. Schließlich werden auch Bodenflächen und stark strukturierte Zonen, sowohl vertikal als auch horizontal, ausgewiesen.
- **Ableitung von zusätzlichen Inventurparametern:** Basierend auf den Bestandesdaten wurden Methoden zur automatischen Ableitung von folgenden **zusätzlichen forstlichen Parametern** entwickelt, wie z.B. Baumhöhe, die mittlere Baumhöhe, Lücken, Schichthöhen und der BHD.
- **3D Extraktion/Modellierung von Einzelbäumen:** Hierbei wurde ein völlig neuer Algorithmus entwickelt, der direkt auf den 3D Laserspots aufbaut. Ein Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit der Erkennung von mehrschichtigen Waldstrukturen und verdeckten unterständigen Bäumen. Dies ist bei Methoden die ausschließlich auf einem DOM basieren, nicht möglich.
- **TreesVis Erweiterung:** Integration aller zuvor aufgelisteten Komponenten in das Visualisierungs- und Berechnungsprogrammssystem TreesVis. Damit steht ein Arbeitstool zur Verfügung, das sowohl für praktische Arbeiten als auch für weitere Forschungstätigkeiten gewinnbringend einsetzbar ist.

### 3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Der Verwertungsplan wurde eingehalten. Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und erteilte Schutzrechte, die vom Zuwendungsempfänger oder von am Vorhaben Beteiligten gemacht oder in Anspruch genommen wurden, sowie deren standortbezogene Verwertung (Lizenzen u.a.) wurden keine erhoben.

Verwertungsmöglichkeiten sind in den drei folgenden Bereichen möglich.

Im Falle, dass das entwickelte Waldstrassenerkennungsprogramm in Zukunft so erweitert wird, das es eine intuitive, den Bearbeiter unterstützende grafische Benutzeroberfläche ent-

hält, die es ermöglicht, dass das System unter Führung eines menschlichen Nutzers eine semi-automatische Erkennung, Verfolgung und Klassifizierung von Straßen durchführt, dann ist dies sicherlich ein Tool, das sowohl im privaten als auch im staatlichen Forstbereich eine große Nachfrage erreichen wird. Außerdem wären sicherlich auch Organisationen aus den Bereichen Landschaftspflege, -planung und Touristik etc. an einem solchen System interessiert.

Die Einzelbaummodellierung ist der zweite Bereich in dem Verwertungsmöglichkeiten erwachsen könnten. Insbesondere wenn es gelingt, z.B. durch verbesserte Algorithmen zur Datenfusion, auch die wichtigsten Baumarten zuverlässig bestimmen zu können. Dies wäre besonders im Privatwaldbereich von großem Nutzen, da dort oftmals überhaupt keine oder im Vergleich zum Staats-/Stadt-Wald, nur sehr geringe Informationen über die Zusammensetzung und den Zustand des Waldes vorliegen.

Schließlich ist hier auch noch der Bereich Waldinventur aufzuführen. Eine neu gestaltete Inventuraufnahme bei der eine kombinierte Auswertung die jetzige Vorgehensweise ersetzen könnte. Dabei würden die terrestrischen Aufnahmen, ob konventionell oder mit einem terrestrischen Laserscanner durchgeführt, auf ein Minimum reduziert werden. Die Ergebnisse dieses Teils der Inventur würden zur Kalibrierung der flugzeuggetragenen Datenauswertung dienen. D.h. einen terrestrischen Aufnahmeanteil wird es höchstwahrscheinlich immer geben, aber sein Anteil an der gesamten Bearbeitung könnte auf einen Bruchteil reduziert und damit der Zeitaufwand und die Kosten signifikant verringert werden.

### **3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Die Bruchkantendetektion konnte nicht vollständig, sondern nur teilweise implementiert werden. Allerdings traten in den bearbeiteten Projektgebieten keine Fälle auf, die dazugeführt hätten, dass die abgeleiteten forstlichen Parameter sich durch die nicht Erkennung dieser Kanten, signifikant geändert hätten. Das wäre wahrscheinlich der Fall gewesen, wenn die Testgebiete im Hochgebirge gelegen wären.

### **3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)**

Beim Abschluss-symposium konnten sich mögliche Nutzer überregional ausführlich über die sie interessierenden Themen informieren. Die Veranstaltung wurde medienwirksam beworben.

### **3.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

Die Ausgaben wurden eingehalten, was auch für den Zeitplan zutrifft. Allerdings mussten Verschiebungen bei der Lösung der unterschiedlichen Arbeitspakete durchgeführt werden, was aber nicht überrascht, da man gerade bei der Entwicklung und Implementierung neuer Methoden im Vorhinein noch gar nicht sagen kann wo, wann, welche Probleme auftreten werden.

## 4 Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)  Schlussbericht	
3. Titel  „Rationelle und präzise Bestandese Erfassung“ (TP1)  im Verbundprojekt „MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung“		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Koch, Barbara  Weinacker, Holger	5. Abschlussdatum des Vorhabens  31.12.2008	6. Veröffentlichungsdatum
	7. Form der Publikation  Schlussbericht	
	8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Abteilung für Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme  Albert-Ludwigs-Universität Freiburg  Tennenbacherstraße 4  79085 Freiburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
11. Seitenzahl  43		
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 53170 Bonn		13. Literaturangaben  28
	15. Abbildungen  24	
	16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 53170 Bonn		

## 18. Kurzfassung

Die Hauptzielsetzung im TP1 (FeLis) war die Schaffung von Grundlagen für ein neues Inventurverfahren, das als kombiniertes Verfahren aus flugzeuggetragenen Informationen und terrestrischen Stichproben, konzipiert ist. Die Kombination von terrestrischen Inventuren mit Fernerkundungs-Informationen bietet grundsätzlich die Chance, (1) den Aufnahmearbeit unter bestimmten Umständen zu reduzieren (Rationalisierung) bzw. (2) für kleinere Befundeinheiten, die nur mit wenigen terrestrischen Stichproben erfasst werden, die Schätzgenauigkeit zu verbessern (Effizienzsteigerung). D.h. die eigentliche Aufgabe bestand darin automatisierte Auswerteverfahren zur Informationsgewinnung über die räumliche Verteilung des Holzvorrates und der Waldstrukturen zu entwickeln und zu implementieren.

Die wichtigsten Methoden, die entwickelt und implementiert wurden, sind folgende:

1a) Ein binäres Datenformat zur effektiven Speicherung von Laserrohdaten. Das bereits existierende Format wurde so erweitert, das bei den flugzeuggetragenen Lidardaten zusätzlich zu der 3D-Information (Rechtswert, Hochwert und Höhe) jetzt weitere Parameter gespeichert werden können, sofern sie zur Verfügung standen. Dies sind z.B. die Amplitude, die Weite und die Intensität jedes einzelnen Laserspots. Es können jetzt auch terrestrische Laserdaten, die eine vollkommen andere räumliche Verteilung aufweisen, effektiv abgespeichert werden. Dazu werden diese Daten in unterschiedlich großen Voxel abgelegt. Die durchgeführten Änderungen und Erweiterungen erlauben eine gleichzeitige Echtzeitvisualisierung terrestrischer als auch flugzeuggetragener Laserdaten.

1b) Entwicklung einer Methode zur Auswertung der Full-Waveform Daten. Der gesamte zurückgestrahlte Laserstrahl wird bei diesen Lidarsystemen registriert. Der entwickelte Algorithmus basiert auf der Annahme, das die reflektierten Pulse sich aus einem oder aus einer Kombination mehrerer „Gaußfunktionen“ zusammensetzen. Alle Treffer eines Strahls werden in einem einzigen Ausgleichsprozess simultan angepasst. Als Ergebnis erhält man die unter Punkt 1a aufgeführten Lageinformationen und die zusätzlichen Parameter. Diese Daten können in weiteren Klassifizierungsschritten vorteilhaft eingebracht werden.

2) In diesem Projekt sollten Parameter für flächenmäßig sehr große Gebiete abgeleitet werden, deshalb musste der bereits bestehende Algorithmus zur Berechnung der Oberflächen- und Geländemodelle erweitert werden. Dabei wurde Wert darauf gelegt, dass eine bedienerfreundliche Lösung gefunden wurde. Es wurde bei der Entwicklung darauf geachtet, dass die Berechnungszeiten in solchen Dimensionen liegen, dass das Programm in der Praxis auch wirklich eingesetzt werden kann.

3) Separierung von Vegetationsbereichen bzw. Offenland und Nicht-Vegetationsgebieten. Dieses Modul war notwendig, da es die Voraussetzungen für den nächsten Schritt, die Waldflächenextraktion, liefert. Der Prozessierungsschritt liefert den Input für eine eventuell folgende semi-automatische oder voll-automatische Extraktion von Man-Made-Objekten, d.h. z.B. von Gebäuden.

4) Bestimmung von Waldflächen. Hierbei war die erste und grundlegende Aufgabe eine Definition für den Begriff Wald zu finden. Dabei musste berücksichtigt werden, dass die Definition Wald die in der Forstverwaltung gebräuchlich ist nicht für die Erkennung bzw. die Separierung geeignet ist, da diese Definition auch verwaltungstechnische Parameter beinhalten, die nicht mittels Fernerkundungsdaten wieder gespiegelt werden. Das Modul liefert fast identische Ergebnisse im Vergleich zu einer manuellen Delinierung, jedoch ist der Zeitaufwand wesentlich geringer und somit günstiger.

Weiterhin war es notwendig Methoden zu entwickeln, mit denen ein normalisiertes DSM und normalisierte Rohdatenpunkte berechnet werden können. Diese Daten sind für folgende Berechnungsmodule als Input notwendig:

5) Die Bestandeseinheitendelinierung unterteilt die Waldgebiete in die Hauptbereiche Laub-, Nadel- und Mischwald. Zusätzlich werden diese Bereiche nochmals in jeweils drei Höhenstufen, die frei wählbar sind, aufgeteilt. Damit diese Bestandeseinheiten den zu untersuchenden Wald nicht zu sehr auflgliedern und das Ergebnis etwas mehr den gewohnten Bestandesunterteilungen entspricht, wurden kleine vereinzelt liegende Parzellen, die innerhalb eines größeren Bereiches liegen, diesem zugeordnet. Die maximale Größe einer kleinen Parzelle ist frei wählbar.

6) Die Ableitung von zusätzlichen Inventurparametern war ein weiterer wichtiger Entwicklungspunkt, da diese Daten von den Projektpartnern übernommen werden. Hier sind insbesondere die Baumhöhe, die mittlere Baumhöhe, Lücken, Schichthöhen und der BHD zu nennen.

7) Die Einzelbaumdelineierung und -modellierung basiert direkt auf der 3D-Punkt Wolke. Verglichen mit Verfahren, die auf dem Oberflächenmodell basieren, hat dieser Algorithmus den entscheidenden Vorteil, dass auch Bäume die sich in einer zweiten oder dritten vertikalen Schicht befinden, extrahiert werden können.

8) Die Waldstrassenerkennungsprozedur ermöglicht die semi-automatische Extraktion von Strassen und Wegen unter der Annahme, dass das die Strassen umgebende Gelände eine größere Steigung als die zu erkennende Strasse hat. Als extrahierte Parameter liefert das System sowohl die beiden Ränder der Strasse, die Steigungen basierend auf einer frei wählbaren Kilometrierung, die Radien der in der Strasse enthaltenen Kurven und ebenfalls Informationen über den Lichtraum. Damit werden alle Parameter bestimmt, die festlegen ob eine Waldstrasse von einem LKW befahren werden darf.

9) Verknüpfung von ALS und TLS Daten. Durch die Entwicklung dieses Moduls wird es möglich komplette und sehr detaillierte 3D-Baummodelle zu erzeugen. In der Vergangenheit wurden z.B. nur die terrestrischen Laserdaten genutzt um Einzelbaummodelle zu erzeugen. Dort fehlten jedoch die Informationen aus den oberen Bereichen der Krone. Im Gegensatz dazu fehlten bei den Modellen, die aus den flugzeuggetragenen Laserdaten abgeleitet wurden, detaillierte Informationen aus den unteren Bereichen der Bäume. Diese Mankos ist durch die Kombination beseitigt.

10) Integration aller Module ins Softwaresystem TreesVis. Damit steht sowohl dem wissenschaftlichen als auch dem mehr Praxis orientierten Nutzer ein Tool zur Verfügung mit dessen Hilfe vielfältige Aufgaben gelöst werden können. Dies reicht von der Berechnung von digitalen Oberflächen- und Geländemodellen bis zur Ableitung von normierten Laserdaten.

## 19. Schlagwörter

Lidar, Full-Waveform Lidarscanner, Digitales Oberflächenmodell, automatische Bestandesdelinierung, Einzelbaumdelineierung, semi-automatische Waldstrassenerkennung, Filterung von Rohdaten

## 20. Verlag

## 21. Preis

## 5 Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Zeigt einen komplett zurückgestrahlten Laserimpuls. Die „gaussförmigen“ Ausschläge repräsentieren potentielle Reflektionen an Objekten. Im dargestellten Berechnungsfenster werden alle möglichen Parameter, die aus diesen Daten für jeden Treffer (Pulse) extrahiert werden können, aufgezeigt. Dies ist die 3D Position, die Intensität, die Pulsweite, die Amplitude, die Pulsnummer und die Anzahl aller in einem reflektierten Strahl aufgetretenen Pulse .....28
- Abbildung 2: Berechnung von beliebig großen DOM/DGM durch die Aufteilung des Projektgebietes in frei wählbare Kacheln, die nahtlos aneinander liegen. Zur Berechnung können Überlappungsgebiete, die für die Berechnung notwendigen und benutzten Laserpunkten gewählt werden. Dadurch wird in praktisch allen Fällen gewährleistet, dass für die Höhen an den Berührungslinien der Kacheln immer dieselben Werte auftreten. ....29
- Abbildung 3: Auswahl eines Teilgebietes (blau) aus dem gekachelten Gesamtgebiet (grau) mit der Möglichkeit, dieses Gebiet mit einer anderen Auflösung zu berechnen. Dazu kann der ausgewählte Bereich (blau) mit unterschiedlichen Interpolationsmethoden „resampled“ werden, z.B. bilinear oder bikubisch.....30
- Abbildung 4: Das linke Bild zeigt Laserspots und deren Normalenvektoren die vom Dach eines Gebäudes reflektiert wurden. Eine gleichmäßige Ausrichtung ist deutlich sichtbar, außerdem ist die Länge der Vektoren groß, was zeigt dass das berechnete Bestimmtheitsmaß bei solchen ebenen Objekten wesentlich besser ist, als z.B. bei Vegetation. Im rechten Bild sind die Normalenvektoren von Laserspots die von einer Krone eines Baumes reflektiert wurden, visualisiert. Hier sind die Vektoren sowohl kurz und vollkommen unregelmäßig orientiert. Was wiederum als Indiz für die Zugehörigkeit dieser Punkte zur Klasse Vegetation eingesetzt werden kann. ....31
- Abbildung 5: Basierend auf der Methode von Hoppe und Tovari/Pfeifer 2005, wurden Laserpunkte die „ähnliche“ Normalen besitzen zu Punktgruppen, die Ebenen repräsentieren, segmentiert (linkes Bild). Das rechte Bild zeigt ein Hausdach bei dem die Laserpunkte als Ergebnis zu Flächen (Dachflächen) gruppiert wurden.....32
- Abbildung 6: Eine Waldstraße bzw. ein Waldweg in einem gebirgigen Gelände, ist eine Fläche die eine signifikant geringere Steigung als ihre Umgebung aufweist. Dies ist in der Regel auf beiden Seiten der Straßen bzw. der Wege der Fall.....33

Abbildung 7: Ein Neigungsbild das ein Waldgebiet im Südschwarzwald zeigt (nahe Waldkirch; Kandelgebiet, Höhe bis zu 1400m über NN). Forststraßen, Wege und sogar Trampelpfade sind sichtbar und können automatisch extrahiert werden, wie es die Vergrößerung rechts zeigt.....	33
Abbildung 8: In den meisten Fällen ist das Extraktionsergebnis von guter Qualität, so lange die Querschnitte der Waldstrasse die getroffenen Annahmen erfüllen. Dies ist bei der hier gezeigten Waldstrasse der Fall.....	34
Abbildung 9: Im linken Teilbild werden befahrbare Wege (grün) und nicht befahrbare Wege (rot), die automatisch erkannt und klassifiziert wurden, dargestellt. Die mittlere Abbildung zeigt zwei Straßenabschnitte und die automatisch erkannten Ränder. Im rechten Teilbild wurde innerhalb eines geneigten Hanges basierend auf einem RGB Bild ein Weg erkannt, der mit Hilfe des DGM nicht hätte erkannt werden können. ....	34
Abbildung 10: a) Automatische Delinierung                      b) Manuelle Delinierung .....	36
Abbildung 11: a) Automatische Delinierung    b) manuelle Delinierung .....	37
Abbildung 12: zeigt das Ergebnis der automatischen Bestandeseinheitenklassifizierung. Laubbaumbereiche sind in Blautönen, Nadelbaumbereiche in Grüntönen und Mischwald in Rottönen dargestellt. Die unterschiedlichen Tönungen entsprechen Höhenstufen. Des weiteren werden nicht überdeckte Bodenbereiche in Grau dargestellt. Horizontal stark strukturierte Waldbereiche wurden mit Kreuzmuster und vertikal strukturierte Bereiche mit einem Parallelmuster gekennzeichnet. Dadurch ist bereits eine sehr detaillierte, aussagekräftige Unterteilung des Waldgebietes erreicht worden .....	38
Abbildung 13: Betriebsinventurpunkte (BI-Pkte) integriert ins Programmsystem TreesVis. Dabei wird explizit die genaue Form der BI-Punkte berücksichtigt. ....	39
Abbildung 14: Automatisch abgeleitete forstlichen Parameter an Betriebsinventurpunkten im Testgebiet Waldkirch. Werte sind z.B. mittlere Baumhöhe, Lücken, Schichthöhen etc.....	39
Abbildung 15: a) 20m*20m Gitter                      b): Punkte über NN-Fläche .....	40
Abbildung 16: a) Rohdaten in zwei                      b) Zweischichtiger Bestand.....	40
Abbildung 17: Erkennung von sich überlappenden Höhenschichtenbereichen. Ist dies der Fall befindet sich in dem zu untersuchenden Bereich ein mindestens zweischichtiger Bestand.....	41

Abbildung 19: Ein gevoxeltes Baummodell erzeugt aus der 3D Einzelbaumdelinierung basierend auf Laserrohdaten und daraus abgeleitete Parameter.....	42
Abbildung 20: Darstellung der Speicherung von ALS Daten. Das mit Rohdaten abgedeckte Gebiet wird in quadratische Säulen mit einer frei wählbaren Seitenlänge unterteilt. Jede Säule repräsentiert einen Block von Rohdaten, die separat im Speicher abgelegt werden. ....	44
Abbildung 21: Darstellung der Speicherung von terrestrischen Laserdaten (TLS). TLS Daten sind sehr ungleichmäßig verteilt (sphärisch), deshalb werden sie in 3D-Quadern mit freiwählbarer Seitenlänge in einem besonderen binären Format gespeichert. Dies ist notwendig um eine 3D-Visualisierung in Echtzeit gewährleisten zu können.....	44
Abbildung 22: Kopie des Bearbeitungsfensters für die Georeferenzierung der TLS Daten im Programmpaket TreesVis.....	45
Abbildung 23: Georeferenzierte TLS Daten. Die Abbildung zeigt Laserspots die von drei terrestrischen Laseraufnahmen stammen. Die Daten sind sowohl relativ als auch absolut orientiert, d.h. sie liegen nach den Transformationen im geodätischen Lage- und Höhensystem vor und können jetzt simultan mit den ALS Daten im TreesVis Programm visualisiert und in weiteren Bearbeitungsschritten verwendet werden. ....	46
Abbildung 24: Simultane Visualisierung der ALS (rot) und der TLS (grau) Daten im Verarbeitungsprogramm. Die Grauwerte bei der Visualisierung der TLS Daten entsprechen deren Intensitätswerten. Da bei den hier gezeigten ALS Daten keine Intensitätswerte gegeben waren, haben diese alle denselben Rot-Wert. Falls hier ebenfalls Intensitätsdaten vorliegen, können auch diese visualisiert werden. ....	47

## 6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Originärer Zeitplan des Teilprojektes TP 1 .....	26
---	----

## Literaturverzeichnis

- BALIC N., WEINACKER H., KOCH B. (2007): Generation of a mosaiced digital true-ortho-photos from multispectral and Lidar data. In: International Journal of Remote Sensing, Vol. 28. No. 16, 20. August 2007, 3679 – 3688

- Bretar F. (2006): Couplage de données laser aéroporté et photogrammétriques pour l'analyse de scènes tridimensionnelles. Ph.D. Thesis. ENST Paris, France.
- BRIESE C. (2004): Three-dimensional modelling of break lines from airborne laser scanner data. In: IAPRS XXXV B/3, Istanbul, Turkey
- CLODE S. et al. (2007): Detection and vectorization of roads from lidar data. In: Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 73(5), 517, 2007
- DONEUS M., BRIESE C. (2006): Full-Waveform airborne laser scanning as a tool for archaeological reconnaissance. In: International Conference on Remote Sensing in Archeology, Rome
- GROSS H., JUTZI B., THOENESSEN U. (2007): Segmentation of tree regions using data of a full-waveform laser. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences 36 (Part 3/W49A), 57-62
- HOLLAUS M., Wagner W., MAIER B., SCHADAUER K. (2007): Airborne Laser Scanning of Forest Stem Volume in a Mountainous Environment. Sensors 7:1559-1577
- HU X., TAO C.V., HU Y. (2004): Automatic road detection from dense urban area by integrated processing of high resolution imagery and LIDAR data. In: International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Science, XXXV (B3), 288, 2004
- JUTZI B., Stilla U. (2006): Range determination with waveform recording laser systems using a Wiener filter. ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing 61(2), 95-107
- KOCH, B., HEYDER U., WEINACKER H. (2006): Detection of Individual Tree Crowns in Airborne Lidar Data. In: Photogrammetric Engineering & Remote Sensing PE&RS Vol. 72, No. 4, April 2006, pp. 357 -363.
- KOCH B. (2007): Mit Laser und Radar werden Wälder erkundet. In: Freiburger Almanach, Jahrbuch 2007, S. 113 – 116.
- KOCH B., STRAUB CH., WANG, Y., WEINACKER H., DEES M. (2009a) Airborne laser data for stand delineation and information extraction. In: International Journal of Remote Sensing (2009). Vol. 30, Issue 4
- KOCH B., HEINZEL J., GUPTA S., WANG Y. & WEINACKER H. (2009b): Extraction of Forest Parameter from Laser Data. In: DGPF Tagungsband 18/2009
- MALLET C., SOERGEL U., BRETAR F. (2008): Analysis of full-waveform lidar data for an accurate classification of urban areas. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 37 (Part 3A), 85-92

- MALTAMO M., MALINEN J., PACKALEN P., SUVANTO A., KANGAS J. (2006): Nonparametric estimation of stem volume using laser scanning, aerial photography and stand-register data. *Canadian Journal of Forest Research* 36:426-436
- MANDLBAUER G. (2006): Topographische Modelle für Anwendungen in Hydraulik und Hydrologie. PhD. Thesis, Vienna University of Technology, [http://www.ipf.tuwien.ac.at/phdtheses/diss\\_gm\\_06.pdf](http://www.ipf.tuwien.ac.at/phdtheses/diss_gm_06.pdf)
- REITBERGER J., KRZYTEK P., STILLA U. (2007): Combining tree segmentation and stem detection using full-waveform lidar data. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 36 (Part 3/W52), 332-337
- REITBERGER J., KRZYTEK P., STILLA U. (2008a): Analysis of full waveform LIDAR data for the classification of deciduous and coniferous trees. *International Journal of Remote Sensing* 29 (5), 1407 - 1431
- REITBERGER J., SCHNÖRR C., KRZYTEK P., STILLA U. (2008b): 3D segmentation of full-waveform lidar data for single tree detection using normalized cutes. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37 (Part 3A), 77-83
- STRAUB CH., WEINACKER H., DIEDERSHAGEN O. & KOCH B. (2006): Standwise delineation based in 3-D Information from LIDAR. Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry, 14. – 15. Febr. 2006, Wien, Universität für Bodenkultur.. In Proceedings. „3D Remote Sensing in Forestry“. [www.rali.boku.ac.at/fileadmin/\\_/H85/H857/workshop/3drsforestry/Proceedings\\_3D Remote Sensing 2006.pdf](http://www.rali.boku.ac.at/fileadmin/_/H85/H857/workshop/3drsforestry/Proceedings_3D Remote Sensing 2006.pdf)
- TOVARI D.; PFEIFER N. (2005): Segmentation based robust interpolation - a new approach to laser data filtering. In: *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. XXXVI-3/W19. Enschede, The Netherlands
- WAGNER W., ULLRICH A, DUCIC V, MELZER T., STUDNIKA N. (2006): Gaussian decomposition and calibration of a novel small-footprint full-waveform digitizing airborne laser scanner, *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 60(2), 100-112
- WAGNER W., HOLLAUS M., BRIESE C., DUCIC V. (2008a): 3D vegetation mapping using small-footprint full-waveform airborne laser scanners. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37 (Part1), 163-168

- WAGNER W., HYYPPÄ J., ULLRICH A., LEHNER H., BRIESE C., KAASALAINEN S. (2008b): Radiometric calibration of full-waveform small-footprint airborne laser scanners. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 37 (Part1), 100-112
- WANG Y., WEINACKER H. KOCH B. (2007): Development of a Procedure for Vertical Structure Analysis and 3 D-Single tree Extraction within Forests based on Lidar Point Cloud. *ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007*, Espoo, Finland, 12. – 14. Sept. 2007.
- WANG Y., WEINACKER H., KOCH B. (2008a). A Lidar Point Cloud Based Procedure for Vertical Canopy Structure Analysis and 3D Single Tree Modeling in Forest. *Sensors* 2008, 8, 3938-3951, ISSN 1424-8220.
- WANG Y., KOCH B., WEINACKER H. (2008b): LIDAR Point Cloud Based Fully Automatic 3D Single Tree Modelling in Forest and Evaluations of the Procedure. *The XXI Congress, ISPRS 2008, Beijing. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVII. Part B8. Beijing 2008.*
- WANG Z., BOESCH R., GINZLER C. (2007): Color And Lidar Data Fusion – Application To Automatic Forest Boundary Delineation In Aerial Images, *ISPRS Hanover Workshop 2007: High-Resolution Earth Imaging for Geospatial Information*

## 7 Anhang

Keine

# Teilprojekt 1:

## Rationelle und präzise Bestandeserfassung

Abteilung Biometrie und Informatik

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
Baden-Württemberg

## Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Abteilung Biometrie und Informatik, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg	Förderkennzeichen: 0330616B
Vorhabenbezeichnung: MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung Teilprojekt 1: Rationelle und präzise Bestandese Erfassung	
Johannes Breidenbach	
Laufzeit des Vorhabens: 1. September 2005 bis 31. Dezember 2008	
Berichtszeitraum: 1. September 2005 bis 31. Dezember 2008	

## **MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung**

### **Teilprojekt 1: Rationelle und präzise Bestandese Erfassung**

Johannes Breidenbach

Abteilung Biometrie und Informatik, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Freiburg, Juni 2009

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Kurze Darstellung des Teilvorhabens</b>	<b>68</b>
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	68
1.2	Vorraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	69
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	69
1.4	Wissenschaftliche und technische Anknüpfung	69
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	70
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>70</b>
2.1	Erzielte Ergebnisse	70
2.2	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans	84
2.3	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	85
2.4	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	85
<b>3</b>	<b>Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht</b>	<b>85</b>
3.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	85
3.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen	85
3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	86

---

3.4	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer	86
3.5	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	86
<b>4</b>	<b>Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)</b>	<b>87</b>
<b>5</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>87</b>

# 1 Kurze Darstellung des Teilvorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Verbundprojekt sollten im Rahmen einer Prozessoptimierung die Materialströme und die begleitenden Informationsströme zwischen Wald und Holzindustrie in geeigneter Form und unter Einsatz moderner Informationstechnologien organisiert, aufeinander abgestimmt und optimiert werden. Das übergeordnete Hauptziel war es, für spezifische Produkte und Produktionsverfahren der Holzindustrie das jeweils am besten geeignete Rohholz zum vereinbarten Zeitpunkt in der erforderlichen Menge und unter möglichst geringen Umweltbelastungen zu wettbewerbsfähigen Kosten bereit zu stellen.

Bezogen auf das Teilprojekt der Ressourcenerfassung bedeutete dies, dass eine möglichst aktuelle Kenntnis der räumlichen Verteilung und der Struktur ist für die Rohstoffbereitstellung aus dem Wald von überragender Bedeutung ist. Sie bildet die Grundlage für die Optimierung der Wertschöpfungskette vom Baum zum Produkt.

Die Bundeswaldinventur liefert wichtige Daten zur Struktur der Wälder zu einem einheitlichen Zeitpunkt, erlaubt jedoch auf Grund der relativ großen Rasterweite (2 km) nur eingeschränkte Aussagen über die kleinräumliche Verteilung des Holzvorrats. Betriebsinventuren liegen zwar in einer höheren räumlichen Dichte (100x200 m) vor, decken aber jeweils nur kleine Gebiete ab, so dass sie für größere Regionen stets ein Mittel aus unterschiedlich alten Inventuren darstellen.

Ziel des Projektes war es daher, detaillierte Informationen zur räumlichen Verteilung des Holzvorrates und seiner Baumarten- und Stärkeklassenzusammensetzung (= Vorratsstruktur) über automatisierte Auswerteverfahren bereitzustellen. Als erster Schritt sollte die Struktur des Holzvorrats der in der Modellregion vorherrschenden Nadelwälder ermittelt werden.

Um die Informationslücke zwischen Betriebs- und Großrauminventuren zu schließen, sollten Regionalisierungsmodelle entwickelt werden, welche Fernerkundungsdaten als flächig vorliegende Hilfsinformation mit terrestrischen Stichprobenpunkten (sog. ground truth) verknüpfen. Dies ermöglicht eine räumliche Interpolation von Punktinformationen.

Die Kombination von terrestrischen Inventuren mit Fernerkundungsinformation bietet grundsätzlich die Chance, den Aufwandaufwand folgender Inventuren unter bestimmten Umständen zu reduzieren (Rationalisierung) bzw. für kleinere Befundeinheiten, die nur mit wenigen terrestrischen Stichproben erfasst werden, die Schätzgenauigkeit zu verbessern (Effizienzsteigerung).

## 1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Aus den im Projekt zur Verfügung stehenden Mitteln konnte eine Wissenschaftlerstelle mit der Hälfte der regelmäßigen Arbeitszeit und eine ebensolche Stelle einer wissenschaftlichen Hilfskraft besetzt werden. Der wissenschaftliche Mitarbeiter hat die Koordination des Projektes und die Anweisung der Hilfskräfte (Stelle wurde auf mehrere Mitarbeiter aufgegliedert) übernommen. Mehrere Stammmitarbeiter der FVA haben insbesondere in den Bereichen statistische Modellierung und GIS einen Teil ihrer Arbeitszeit für Hilfe und Beratung zur Verfügung gestellt.

## 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

In der Projektplanung waren drei Meilensteine vorgesehen: Zunächst sollte ein Mitarbeiter der FVA für ein Jahr an der Universität Freiburg, Abteilung Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme (FELIS), arbeiten und in dieser Zeit die notwendigen erklärenden Variablen aus Laserdaten ableiten (Meilenstein 1). Die Laserrohdaten für das gesamte Land (also nicht nur für das Projektgebiet) wurden jedoch ohnehin an der FVA abgespeichert, um der Forstverwaltung das hochgenaue Digitale Geländemodell (DGM) frühzeitig (vor Veröffentlichung des offiziellen Laser-DGM des Landesvermessungsamtes) zur Verfügung zu stellen. Daher hat es sich als zielführender erwiesen, den Arbeitsplatz nicht zu verlegen und die Aufbereitung der Daten direkt an der FVA durchzuführen. Regelmäßige Treffen (auch im Zusammenhang mit Lehrtätigkeit) haben den Informationsaustausch sichergestellt.

Die Modellanpassung sowie Validierung (Meilenstein 2) und die Regionalisierung, d.h. die Übertragung des Modells auf die Fläche (Meilenstein 3) sind wie geplant durchgeführt worden.

## 1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfung

Die Abteilung Biometrie und Informatik der FVA Freiburg befasst sich seit Jahren schwerpunktmäßig mit Waldinventuren (vgl. HRADETZKY 2001, KÄNDLER und BÖSCH 2002, KÄNDLER et. al 2004) und besitzt umfassende Erfahrung in der Verfahrensentwicklung (Konzeption, Programmierung), im operativen Bereich (Landesinventurleitung für BWI), der Modellierung, der Holzaufkommensprognose (vg. BÖSCH 1995) und der Datenanalyse (vgl. SCHÖPFER 1998). In der Abteilung ist das Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodell für die zweite Bundeswaldinventur im Auftrag des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft entwickelt worden. Für die Bundeswaldinventur und

Betriebsinventuren wurden Auswertungs- und Analyseprogramme konzipiert und implementiert. Die Integration von Fernerkundungsdaten war ein neuer Themenbereich, und das Forschungsprojekt hat maßgeblich dazu beigetragen, das know-how an der Abteilung zu vergrößern.

## 1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Eine direkte Zusammenarbeit war außer mit wissenschaftlichen Projektpartnern (insbes. Abt. FELIS) nicht geplant. Allerdings haben sich im Laufe des Projektes einige interessante Kooperationsmöglichkeiten ergeben. So konnte ein Projektmitarbeiter während eines dreimonatigen Forschungsaufenthalts mit einem Forscherteam ähnlicher Ausrichtung in den USA (Precision Forestry Cooperative der University of Washington in Seattle) zusammenarbeiten. Zudem wurde nach Absprache der entsprechenden Schnittstellen sowohl an den im Nutzerpanel integrierten Partner Fürstlich Fürstenbergische Forstverwaltung als auch an das im gleichen Forschungsrahmenprogramm geförderte Projekt Ostalb mittels Laserdaten regionalisierte Inventurdaten abgegeben.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Erzielte Ergebnisse

Grundsätzlich lassen sich zwei **Auswertungsmethoden in Bezug auf Airborne Laserscannerdaten** (ALS) unterscheiden. Die Anwendbarkeit der Methoden hängt von der Punktdichte der Rohdaten ab. Dabei werden Laserdaten mit einer Punktdichte  $>1 \text{ m}^{-2}$  als hoch und von  $<1 \text{ m}^{-2}$  als gering aufgelöst bezeichnet.

Hoch aufgelöste Laserdaten lassen eine Auswertung auf Einzelbaumebene zu. Dabei werden Einzelbaumkronen segmentiert und die berechenbaren Parameter wie Baumhöhe, Kronendurchmesser und -länge als erklärende Variablen zur Schätzung der primären Zielgröße wie des Brusthöhendurchmessers (BHD) oder des Holzvolumens des Baums verwendet (z.B. Persson et al. 2002). Zur Quantifizierung dieser Beziehungen muss die Position einer ausreichend großen Anzahl von Einzelbäumen mit hoher Genauigkeit bekannt sein. Dies erfordert aufwendige und damit kostenintensive Vermessungsprozeduren.

Zur Bestimmung von Einzelbaumparametern, insbesondere für kleine Bäume, sind Laserdaten geringer Punktdichte zu grob. Sie eignen sich jedoch für den Einsatz plotweiser Verfahren (Næsset et al. 2004). Hierbei ist die Zielvariable eine auf einer kleinen Fläche

aggregierte Kenngröße, wie z.B. die Mittelhöhe, die für einen Stichprobenplot<sup>1</sup> berechnet werden kann. Auch die Laserdaten werden aggregiert und deren Struktur mittels Verteilungsmaßen, sog. Höhen- und Dichtemetriken beschrieben. Aus DOM und DGM lassen sich weitere Informationen, wie z.B. der Überschirmungsgrad ableiten, die zusammen mit den Metriken die erklärenden Variablen darstellen.

Zwar lassen plotweise Verfahren keine Aussagen auf der kleinsten im Wald interessierenden Ebene, dem Baum, zu. Allerdings bieten sie im Vergleich von Einzelbaumverfahren eine Reihe von Vorteilen, weshalb sie in dieser Arbeit näher untersucht werden: Es kann mit Daten relativ geringer Punktdichte gearbeitet werden. Folglich fallen entsprechend niedrigere Kosten für die Datenbeschaffung an. Zudem liegen solche Laserdaten für das gesamte Land Baden-Württemberg vor. Als Referenz können Inventurplots herkömmlicher Betriebsinventuren verwendet werden. Obwohl bekannt ist, dass diese einen Lagefehler unbekannter Größe aufweisen, haben Voruntersuchungen gezeigt, dass deren Verwendung zulässig ist. Da die gesamte Probekreisfläche (452 m<sup>2</sup>) betrachtet wird, fällt insbesondere ein kleiner Lagefehler kaum ins Gewicht. Beim Einzelbaumverfahren kann dies bereits zu einer Fehlzurordnung des Baums führen. Plotweise Verfahren werden unter den einfacheren<sup>2</sup> Waldverhältnissen in Skandinavien bereits operational in Inventuren eingesetzt (Næsset 2004). Daher war es zweckmäßig zu untersuchen, welche Anpassungen und Erweiterungen zum Einsatz dieser Technik in Mitteleuropa notwendig sind.

Zur **statistischen Analyse** kamen vornehmlich univariate parametrische Verfahren zum Einsatz. Zunehmend komplexere Modelle wurden verwendet, um die ebenso zunehmend komplexeren Zielgrößen Baumhöhe, Vorrat und Durchmesserverteilung zu schätzen. Zur Gewinnung baumartenspezifischer, also multivariater Information ist ein nicht-parametrisches Verfahren, das zur Gruppe der Klassifikations- und Regressionsbäume (CART) zählt, angewandt worden.

Im Hinblick auf die übergeordnete Fragestellung „Präzise Beschreibung der Ressource Holz“ im Teilprojekt 1 wurden die Baumhöhe, der Vorrat und seine Struktur als relevant erachtet. Die Modellierung dieser Zielgrößen in dieser Reihenfolge spiegelt auch den methodisch-wissenschaftlichen Fortschritt im Projekt wider, der in der baumartenspezifischen Modellierung dieser Größen mündete.

---

<sup>1</sup> Als Stichprobenplot wird die Fläche um einen Stichprobenpunkt bezeichnet, auf der die Messung der Waldattribute stattfindet.

<sup>2</sup> In borealen Wäldern ist im Vergleich zu Mitteleuropa beispielsweise die Anzahl der verschiedenen Baumarten ebenso geringer wie der mittlere Vorrat und die Baumhöhe.

In den folgenden Abschnitten soll auf die Modellierung oben angeführter Zielgrößen kurz eingegangen werden. Für die Darstellung der ausführlichen Methodik und Ergebnisse wird auf Breidenbach (2008) verwiesen.

### Schätzung der Höhe

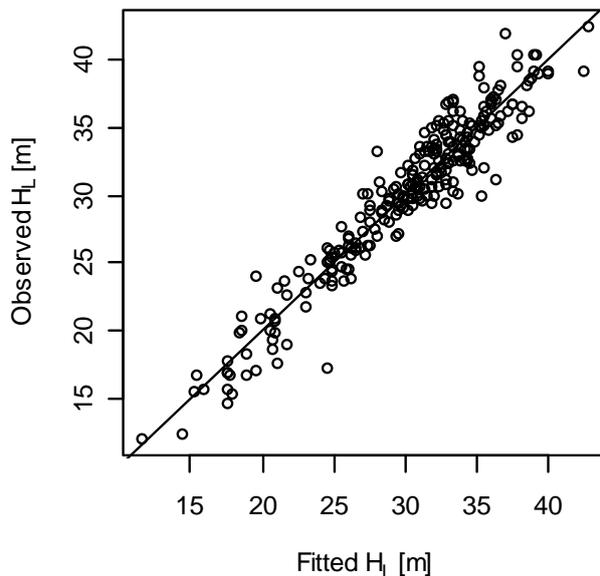
Die Mittelhöhe ist eine wichtige Kenngröße zur Charakterisierung von Beständen im Allgemeinen und in Bezug auf die Wuchsleistung (Bonitierung) sowie das Risiko von Sturmschäden im Speziellen (Schmidt et al., 2005). Erwartungsgemäß lässt sie sich mit hoher Genauigkeit mittels 3D Vegetationshöhendaten schätzen. Die grundflächengewichtete Höhe (**Lorey'sche Höhe**) spielt zudem bei der Vorratsberechnung eine besondere Rolle. Sie wurde daher in multiplen linearen Regressionsmodellen als abhängige Variable verwendet, um zu testen, durch welche unabhängigen Variablen sie beeinflusst wird.

Vorangegangene Studien zeigen, dass sich die Baumhöhe verhältnismäßig gut aus Fernerkundungsgestützten Vegetationshöhendaten ableiten lässt. Daher wurde diese Zielgröße auch genutzt, um mit Laser- und Radardaten zwei verschiedene Klassen von Fernerkundungsdaten miteinander zu vergleichen, die ähnliche Informationen bereitstellen. Der Hintergrund ist, dass ALS Daten noch verhältnismäßig teuer sind und daher auch Alternativen dazu in Betracht gezogen werden sollten.

Die unabhängigen Variablen umfassten daher Höhen- und Dichtemetriken, die sich sowohl aus ALS als auch InSAR (Interferometrisches Synthetische Apertur Radar) Daten errechneten. Die InSAR Vegetationshöhen wurden auf der Basis eines InSAR DOM (Digitales Oberflächenmodell), das für das Untersuchungsgebiet Schorndorf vorliegt, und eines ALS DGM (Digitales Geländemodell) berechnet. Die topographischen Parameter Hangneigung und Exposition konnten auf Basis des ALS DGM berechnet werden. Die Stammzahl und der Nadelbaumanteil wurden aus den Inventurdaten entnommen.

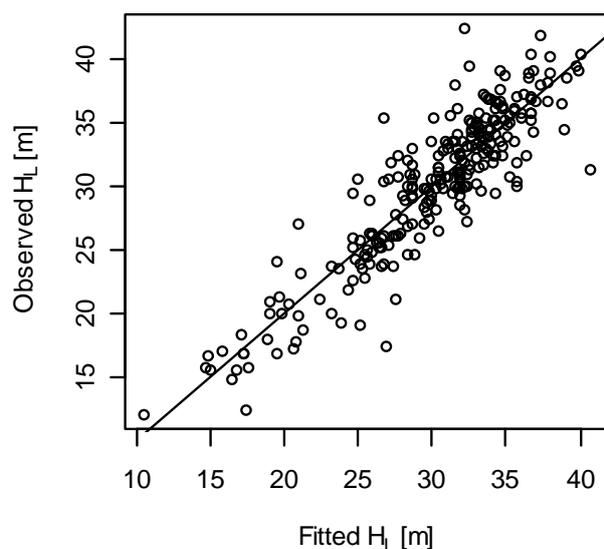
Das Regressionsmodell mit unabhängigen Variablen, die aus Laserdaten stammen (ALS Modell), wies mit einem root mean squared error (RMSE) von 1,8 m einen deutlich geringeren Fehler auf (Abbildung 1), als das Modell mit InSAR Daten (RMSE 2,7 m, Abbildung 2). Dies ist zum Teil auch wegen der geringeren Auflösung der InSAR Daten (Pixelgröße 25 m<sup>2</sup>) plausibel. Die wichtigste erklärende Variable war mit dem 75. Perzentil (ALS) bzw. dem 90. Perzentil (InSAR) erwartungsgemäß eines der obersten Quantile. Sowohl im ALS Modell als auch im InSAR-Modell hatte der Koeffizient der Hangneigung ein negatives Vorzeichen. Das heißt, unter *ceteris paribus* Bedingungen wird die Schätzung anhand der Höhenmetrik nach unten korrigiert. Da dies für Modelle gilt, die auf zwei verschiedenen Fernerkundungsdaten beruhen und davon ausgegangen werden kann, dass

das DGM am Hang keine systematischen Fehler aufweist, ist die Vermutung naheliegend, dass diese Beobachtung von der Waldstruktur abhängt. Wahrscheinlich sind die, auf Grund der Konkurrenz um Licht, talwärts häufig weiter ausladenden Kronenteile dafür verantwortlich, dass die Vegetationshöhe im Vergleich zum ebenen Gelände überschätzt wird.



**Abbildung 1: Beobachtete vs. geschätzte Lorey Höhe aus ALS Daten (Linie = Winkelhalbierende).**

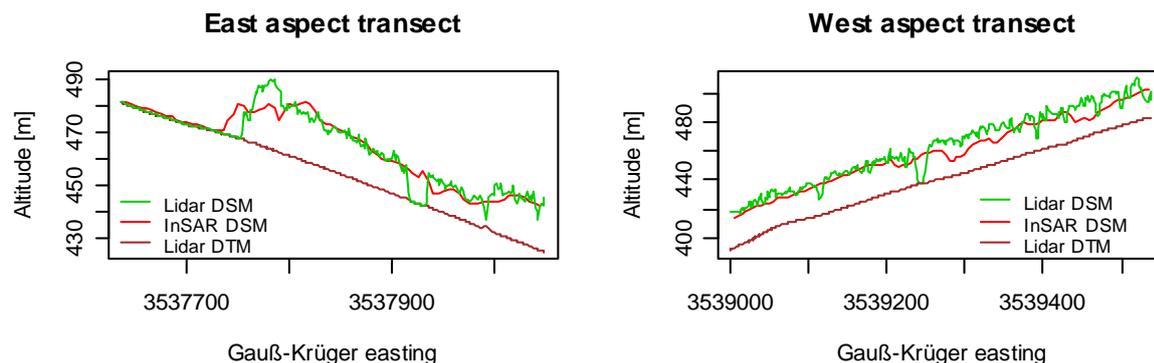
Auf Grund der Seitensichtgeometrie des Radarsensors überrascht es nicht, dass der Einfluss der Hangneigung bei dem InSAR Modell auch von der Exposition, bzw. der Ausrichtung zum Sensor abhängt. Die Hangneigung an den aus Sensorsicht ansteigenden Hängen (upward slopes; niedrige Einfallswinkel) weist dabei einen größeren Koeffizienten auf, als an abfallenden Hängen (downward slopes). Eine plausible Erklärung ist, dass an abgeneigten Hängen wegen des Radarschattens hauptsächlich die hoch gelegenen und damit stammnahen Kronenteile zur Reflektionsbildung beitragen. Sowohl die Erklärungen in Hinblick auf den Einfluss der Hangneigung als auch der Hangausrichtung haben hypothetischen Charakter und können mit empirisch statistischen Modellen außerhalb eines kontrollierten Experiments nicht bewiesen werden.



**Abbildung 2: Beobachtete vs. geschätzte Lorey Höhe aus InSAR Daten (Linie = Winkelhalbierende).**

Die Vegetationsparameter Stammzahl und Nadelbaumanteil, die hier nur aus Inventurdaten gewonnen werden konnten, beeinflussen sowohl das ALS, als auch das InSAR Modell in die gleiche Richtung: Mit zunehmendem Nadelbaumanteil nimmt die Lorey'sche Höhe zu. Das Gegenteil ist bei zunehmender Stammzahl zu beobachten. Allerdings ist der Einfluss der Stammzahl im ALS Modell sehr gering. Da mit zunehmender Baumhöhe auch tendenziell die Stammzahl abnimmt, wurde das 90% Perzentil der InSAR Vegetationshöhe im Modell ohne die Stammzahl als erklärende Variable als Polynom zweiten Grades modelliert.

Durch die Aufnahme von Dichtemetriken als erklärende Variablen konnte der Nadelbaumanteil im auf InSAR Daten basierenden Modell substituiert werden. Dies gilt jedoch nicht für das ALS Modell und die Stammzahl (in beiden Modellen). Bei einem direkten Vergleich des ALS- und InSAR-DOM zeigt sich, dass das InSAR-DOM an allen Bruchkanten (Waldrand, Wege) starke Verzerrungen aufweist (Abbildung 3). Dabei kommt es zu horizontalen Verschiebungen der Kanten sowie zu Über- und Unterschätzungen der tatsächlichen Vegetationshöhen. Das Ausmaß der Verzerrung ist von der Größe der Bruchkante und dem Einfallswinkel abhängig. Auf Grund dieses als edge effect bekannten Problems wird die Güte von Modellen die auf InSAR Daten beruhen schlechter, je stärker der Wald fragmentiert ist.



**Abbildung 3: Vergleich der ALS und InSAR Oberflächenmodelle entlang zweier Transekte.**

### Schätzung des Holzvorrats

Die Kenntnis des Holzvorrats spielt in Wirtschaftswäldern eine entscheidende Rolle, da seine Höhe die Nutzungsmöglichkeiten bestimmt und ein Maß für die waldbauliche Entwicklung darstellt. Zur Vorratsschätzung werden meist klassische lineare Regressionen mit logarithmischer Transformation der Zielvariable zur Varianzhomogenisierung angewendet (z.B. Næsset et al., 2004). Bei der Rücktransformation kann es jedoch trotz Biasausgleichs zu Verzerrungen kommen (Breidenbach et al., 2006), da häufig nicht alle Modellannahmen exakt zutreffen.

Statt des klassischen Regressionsmodells wird an dieser Stelle ein gemischtes lineares Modell, das sowohl fixe als auch zufällige Effekte umfasst, eingesetzt. Parametrisiert wird das Modell an den Daten der Untersuchungsgebiete Triberg, Forbach, Stadtwald Waldkirch und Staatswald Waldkirch, sowie einem amerikanischen Untersuchungsgebiet. Da sich mehrere Inventurpunkte innerhalb eines Bestandes befinden können und sich die Bestände auf mehrere Forstämter aufgliedern, weisen die analysierten Daten Gruppierungen auf mehreren Ebenen auf. Gemischte Modelle bieten grundsätzlich den Vorteil, dass diese Gruppierungsstruktur bei der Analyse berücksichtigt werden kann. Dabei wird angenommen, dass es sich bei den Beobachtungen um eine Zufallsauswahl aus einer Population handelt. Der fixe Effekt beschreibt dann die Mittelwertfunktion der Population, die Varianz des zufälligen Effekts die Schwankung um den Mittelwert. Der zufällige Effekt für eine Gruppe kann vorhergesagt werden und hat ähnliche Eigenschaften wie ein Koeffizient.

Auch Packalén u. Maltamo (2006) setzen ein gemischtes Modell zur Volumenschätzung ein. Sie gehen jedoch nicht auf die Auswirkung der zufälligen Effekte ein, führen eine logarithmische Transformation der Zielgröße durch, berücksichtigen nicht die räumliche Abhängigkeitsstruktur der Daten und betrachten zudem nur eine Gruppierungsebene.

Zur Überprüfung des Einflusses der zufälligen Effekte wurden drei verschiedene Modelltypen an die Daten angepasst. Als einfachstes Vergleichsmodell diente ein lineares Modell, das lokal, also für jedes Untersuchungsgebiet getrennt, angepasst wurde. Ebenfalls lokal ist ein gemischtes Modell mit einem zufälligen Effekt für den Interzept auf der Bestandesebene angepasst worden.

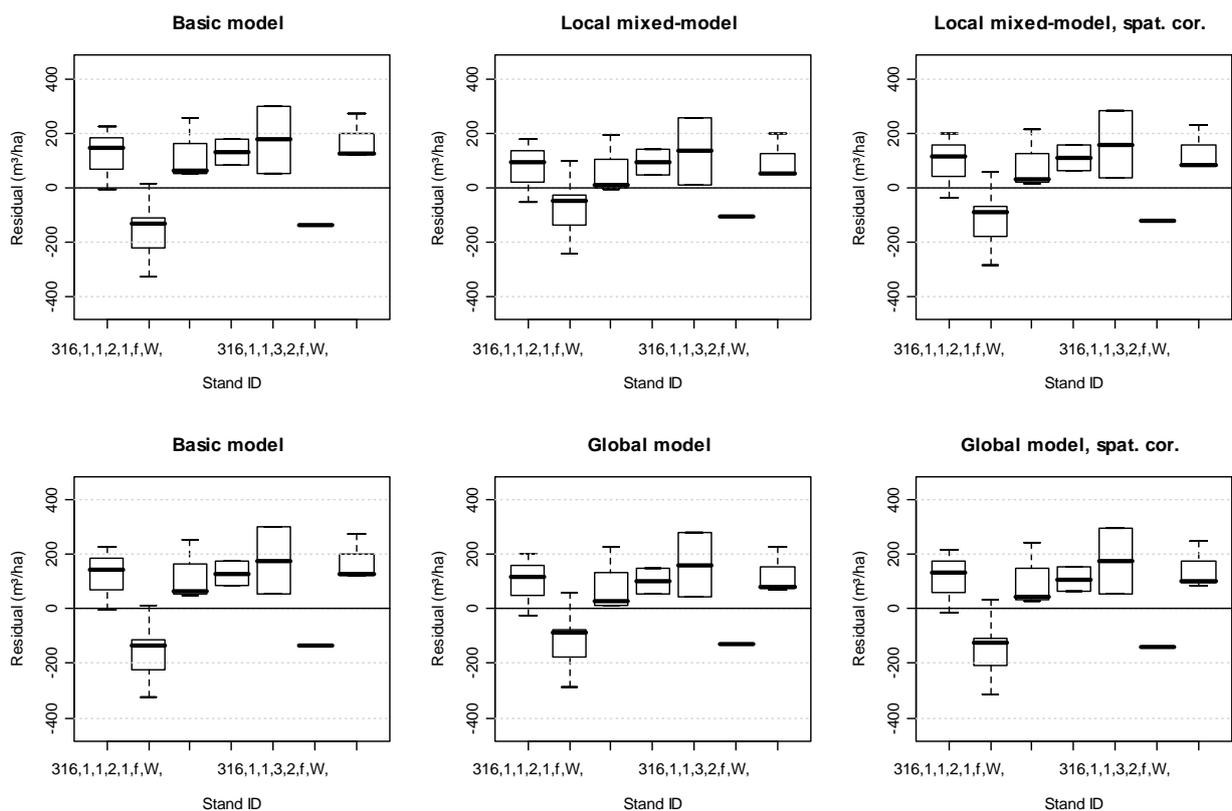
Die Bestände mit Inventurpunkten können als eine Zufallsauswahl aller im jeweiligen Untersuchungsgebiet vorhandenen Bestände angesehen werden. In einem globalen Modell sind zusätzlich zum zufälligen Effekt auf der Bestandesebene auch zufällige Effekte für alle Koeffizienten auf der Untersuchungsgebietesebene enthalten. Auch die Untersuchungsgebiete können als Zufallsauswahl aus allen Forstbezirken in Baden-Württemberg angesehen werden. Für das amerikanische Untersuchungsgebiet sind nur lokale Modelle angepasst worden, da wegen der unterschiedlichen Laserdaten und Waldtypen nicht davon ausgegangen werden kann, dass es aus der gleichen Population stammt wie die deutschen Untersuchungsgebiete. Der Vergleich mit den deutschen Modellen ist dennoch interessant. Die gemischten Modelle wurden mit und ohne den Einfluss der räumlichen Abhängigkeitsstruktur angepasst. Zur Prüfung der Modelle auf Überparametrisierung, wurde eine leave one out Kreuzvalidierung durchgeführt.

Als erklärende Variablen wurde die mittlere Vegetationshöhe, der Überschirmungsgrad und der Nadelbaumanteil ausgewählt. Da der Einfluss letzterer Variablen nicht rein additiv ist, wurde auch die Interaktion mit der Vegetationshöhe als erklärende Variable aufgenommen. Sowohl der Überschirmungsgrad als auch der Nadelbaumanteil beeinflussen die Höhenmetriken. Deshalb wäre eine dreifache Interaktion ebenfalls sinnvoll gewesen. Dies hätte jedoch zu einer unnötigen Modellkomplexität und nicht interpretierbaren Koeffizienten geführt.

Die Koeffizienten weisen in allen Untersuchungsgebieten (inklusive des amerikanischen), ähnliche Werte, d.h. zumindest gleiche Vorzeichen auf. Dies gilt insbesondere für die mittlere Vegetationshöhe als wichtigste erklärende Variable. Etwas überraschend ist, dass der größte Unterschied zwischen den Koeffizienten für den Überschirmungsgrad und den Nadelbaumanteil bei den benachbarten Untersuchungsgebieten, Stadt- und Staatswald Waldkirch auftritt. Dies zeigt, dass Modelle, die in einem Gebiet mit guter Datenbasis (beispielsweise ein Staatswald mit Betriebsinventur) angepasst wurden, nicht ohne weiteres auf ein anderes Gebiet übertragen werden sollten (beispielsweise auf einen benachbarten Privatwald).

Der Fehler (RMSE) ist mit 16.7% im amerikanischen und 24.3% - 32.1% in den deutschen Untersuchungsgebieten bei den gemischten Modellen um 2% - 4% geringer, als bei den

Modellen, die ausschließlich fixe Effekte umfassen. Dies spiegelt sich auch in den Residuen wider: Diese liegen auf der Bestandesebene erwartungsgemäß näher bei Null (Abbildung 4). Eine auf Bestandesebene vorkommende Verzerrung kann folglich durch zufällige Effekte verringert werden. Durch die Berücksichtigung der räumlichen Abhängigkeitsstruktur verschlechtert sich das mittlere Residuum leicht. Ursache dafür ist, dass ein geringerer Teil der Varianz durch den zufälligen Effekt erklärt werden kann, da er als räumliche Varianz aufgefasst wird. Da der Einfluss der räumlichen Lage jedoch auf die Residuen wirkt, spielt er zur Vorhersage des Erwartungswerts keine Rolle.



**Abbildung 4: Residuen verschiedener Modelle in ausgewählten Beständen (Gemischte Modelle in der mittleren und rechten Spalte).**

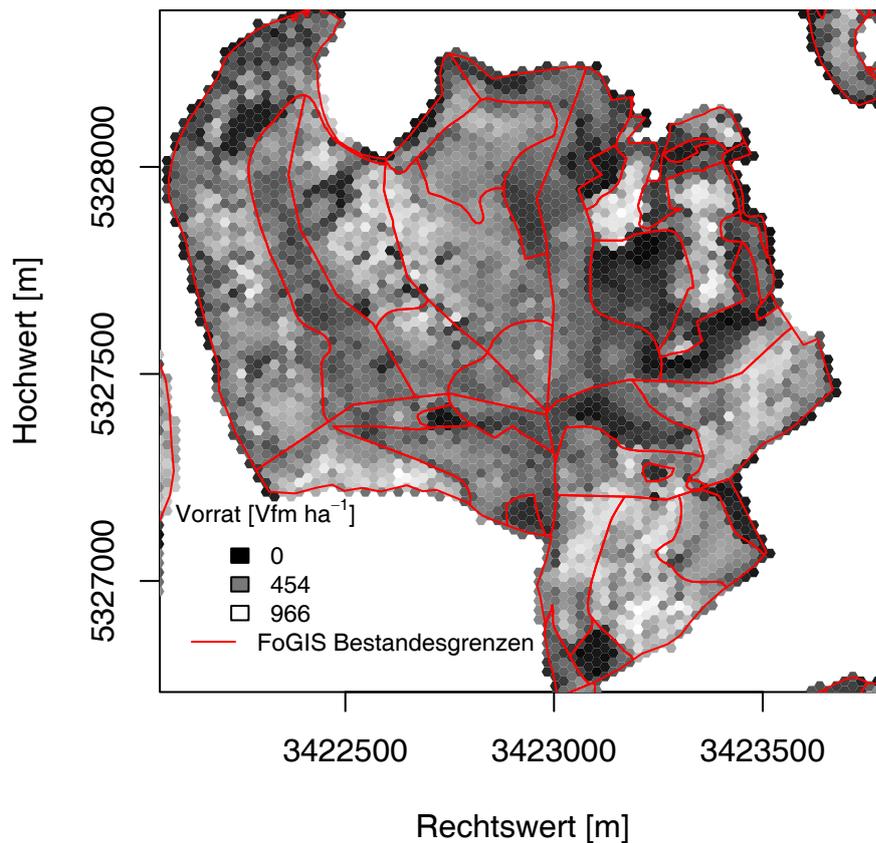
Wie die Ergebnisse zeigen, kann durch den Einsatz gemischter Modelle die Datenstruktur als Information zur Verbesserung von Modellen ausgenutzt werden. Die Gruppenzugehörigkeit könnte allerdings auch in einem klassischen Regressionsmodell Modell als kategoriale Dummyvariable berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich jedoch eine Reihe von Nachteilen: Streng genommen, könnten keine Vorhersagen mehr für Einheiten gemacht werden, die sich nicht im Ursprungsdatensatz befunden haben. Damit wäre beispielsweise keine Aussage für Bestände möglich, in denen keine Inventurpunkte liegen. Da die Varianz bei gemischten Modellen in einen erkläraren (zufällige Effekte) und einen weiterhin unerkläraren Bestandteil aufgeteilt wird, verhalten sich diese konservativ. Daraus

folgt, dass den Beobachtungen auf der Bestandesebene, anders als im klassischen Regressionsmodell Modell mit Dummyvariablen, nicht voll vertraut wird. Stattdessen hängt ihr Einfluss vom Verhältnis erklärbarer zu unerklärbarer Varianz und der Anzahl der Beobachtungen in der jeweiligen Gruppe ab. Das heißt, ist der Restfehler im Verhältnis zu den zufälligen Effekten klein, ist der Einfluss der Beobachtungen groß.

Ein weiterer Vorteil gemischter Modelle ist, dass sie sich mit wenigen Daten kalibrieren lassen. Mit Bezug auf das hier angepasste Modell bedeutet dies, dass die zufälligen Effekte mit wenigen repräsentativen Stichproben in einem Gebiet ohne Betriebsinventur vorhergesagt werden können. Die Anzahl der dazu benötigten Stichprobenpunkte müsste in einer gesonderten Studie, wiederum an gut inventarisierten Wäldern, bestimmt werden. Dadurch ließe sich eine Verzerrung in Abhängigkeit von der Variablen Nadelbaumanteil verhindern, die beispielsweise bei der reinen Übertragung des an den Daten des Untersuchungsgebiets Triberg angepassten Modells auf das Untersuchungsgebiet Forbach auftreten würde.

Über die Anwendung des Modells auf die flächig vorliegenden Laserdaten kann eine flächenhafte Vorhersage der Zielgröße erfolgen. Wie bereits erwähnt, spricht man bei diesem Vorgang von **Regionalisierung**. Dazu wird die Gesamtfläche des Untersuchungsgebiets in gleichförmige Kacheln unterteilt. Die Kachelgröße richtet sich dabei nach der Fläche der Inventurplots, die zur Parametrisierung des Modells verwendet wurden. Um die Zielgröße vorhersagen zu können, werden dann die unabhängigen Variablen für jede Kachel berechnet. Bisher wurden die Prädiktorvariablen meist für quadratische Kacheln berechnet (z.B. Næsset, 2004c; Andersen et al., 2004). Auch wenn es keinen Grund zur Annahme gibt, dass die Form der Kacheln die Vorhersage beeinflussen könnte, werden an dieser Stelle stattdessen Hexagone verwendet, da sie in ihrer Form eher den kreisförmigen Inventurplots entsprechen.

Für einen Ausschnitt des Untersuchungsgebiets Waldkirch ist die Vorhersage des Vorrats in Abbildung 5 beispielhaft dargestellt. Darin ist jedes Hexagon entsprechend dem vorhergesagten Vorrat eingefärbt. Eine solche Karte gibt dem Anwender Hinweise darauf, wie das Volumen innerhalb des Bestandes verteilt ist. Sie könnte im Rahmen der Forsteinrichtungsplanung eine wichtige quantitative Grundlage darstellen. Theoretisch gesehen, könnte die Information, zumindest in den ersten Jahren nach der Laserbefliegung, auch in der operativen Eingriffsplanung hilfreich sein. Allerdings ist zu bedenken, dass die Vorhersagefehler auf dieser Auflösungsebene (Inventurpunktfläche) denen der Regressionsmodelle (24%-32%) entsprechen. Durch die Aggregation der vielen Kachelinformationen in einem Bestand verringert sich der Vorhersagefehler jedoch deutlich.



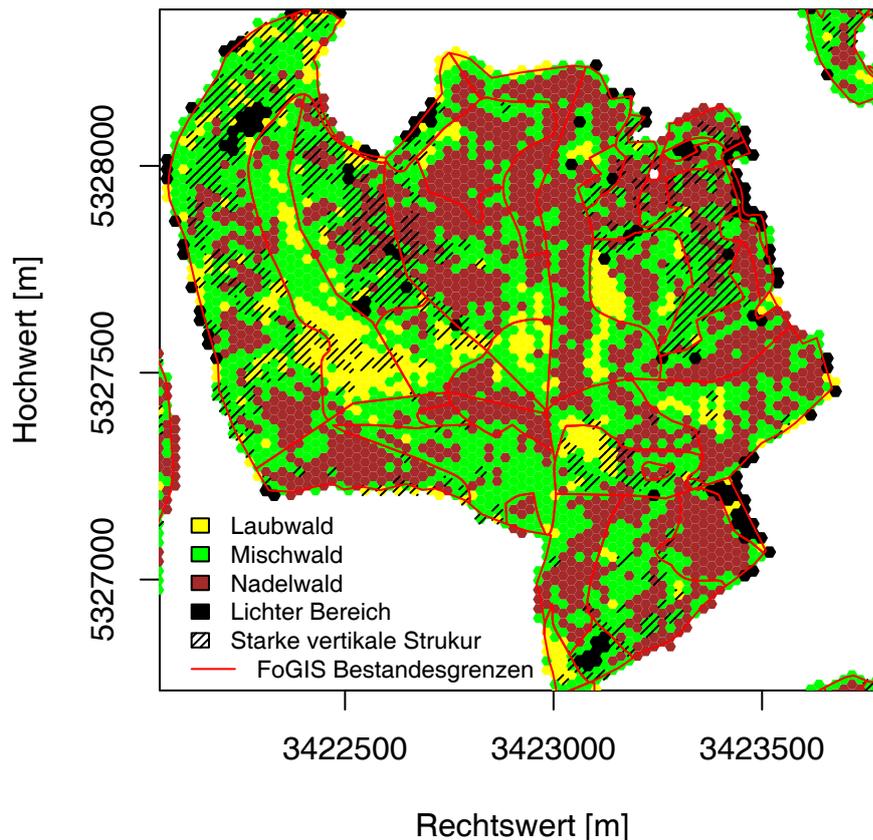
**Abbildung 5: Regionalisierung des Holzvorrats.**

Da zum Teil recht verschiedenartige Bereiche zur einfacheren Planung zu Beständen zusammengefasst werden und häufig nur wenige Stichprobenpunkte innerhalb eines Bestandes liegen, ist der Standardfehler der Betriebsinventur auf Bestandesebene in der Regel zu hoch, um auf den Mittelwert vertrauen zu können. Auf Grund dessen wird dem Anwender über das Betriebsinventurprogramm in Baden-Württemberg, an Stelle des synthetischen Schätzers der Inventurplots im Bestand der Mittelwert der Messungen an den Inventurplots im zugehörigen Waldentwicklungstyp als numerische Kenngröße für den Bestand bereitgestellt.

Um die Bestandesfläche nicht zu überschätzen, werden bei der Regionalisierung nur solche Kacheln als zum Bestand gehörig erachtet, deren Mittelpunkt im Bestand liegt. Durch die Regionalisierung liegen nun viele Beobachtungen (Kacheln) auf Bestandesebene vor. Daher führt die Mittelung der Kachel-Vorhersagen auf der Bestandesebene zu einer deutlichen Verringerung der Varianz im Vergleich zu aggregierten Betriebsinventur-Vorhersagen.

Zusätzlich zur Vorhersage des Holzvorrats können anhand der Laserdaten Bestandeseinheiten oder, innerhalb von bereits ausgewiesenen Beständen, homogenere Subbestandesteile ausgewiesen werden. Eine Mittelung (Aggregation) der Schätzungen auf

Kachelebene für homogenere Bestandesteile könnte den Vorteil bieten, dass sich der Vorhersagefehler auf Grund der Aufgliederung der Varianz nochmals verringert. Auf der anderen Seite kann dies auch eine zunehmende Unübersichtlichkeit zur Folge haben. Zudem ist es fraglich, ob vom Anwender eine weitere Ebene zwischen Kachel und Bestand als sinnvoll erachtet wird. In Abbildung 6 lässt sich erkennen, dass sich über das Nadel- zu Laubbaumverhältnis, den Überschirmungsgrad und die horizontale Struktur, Subbestandeseinheiten ausweisen lassen.



**Abbildung 6: Auswahl der erklärenden Variablen zur Vorratsschätzung die sich auch zur Bestandesabgrenzung eignen können.**

### Schätzung von Durchmesserverteilungen

Sehr unterschiedliche Bestände können den gleichen mittleren Vorrat pro Hektar aufweisen, sich aber von ihrer Durchmesserstruktur her stark unterscheiden. Dabei kann sich der Vorrat z.B. bei einem Bestand auf viele Bäume kleinen Durchmessers, und bei einem anderen auf wenige Bäume großen Durchmessers verteilen. Daher ist zusätzlich zum Gesamtvorrat, auch seine Struktur, d.h. seine Aufteilung in Durchmesserklassen von großer

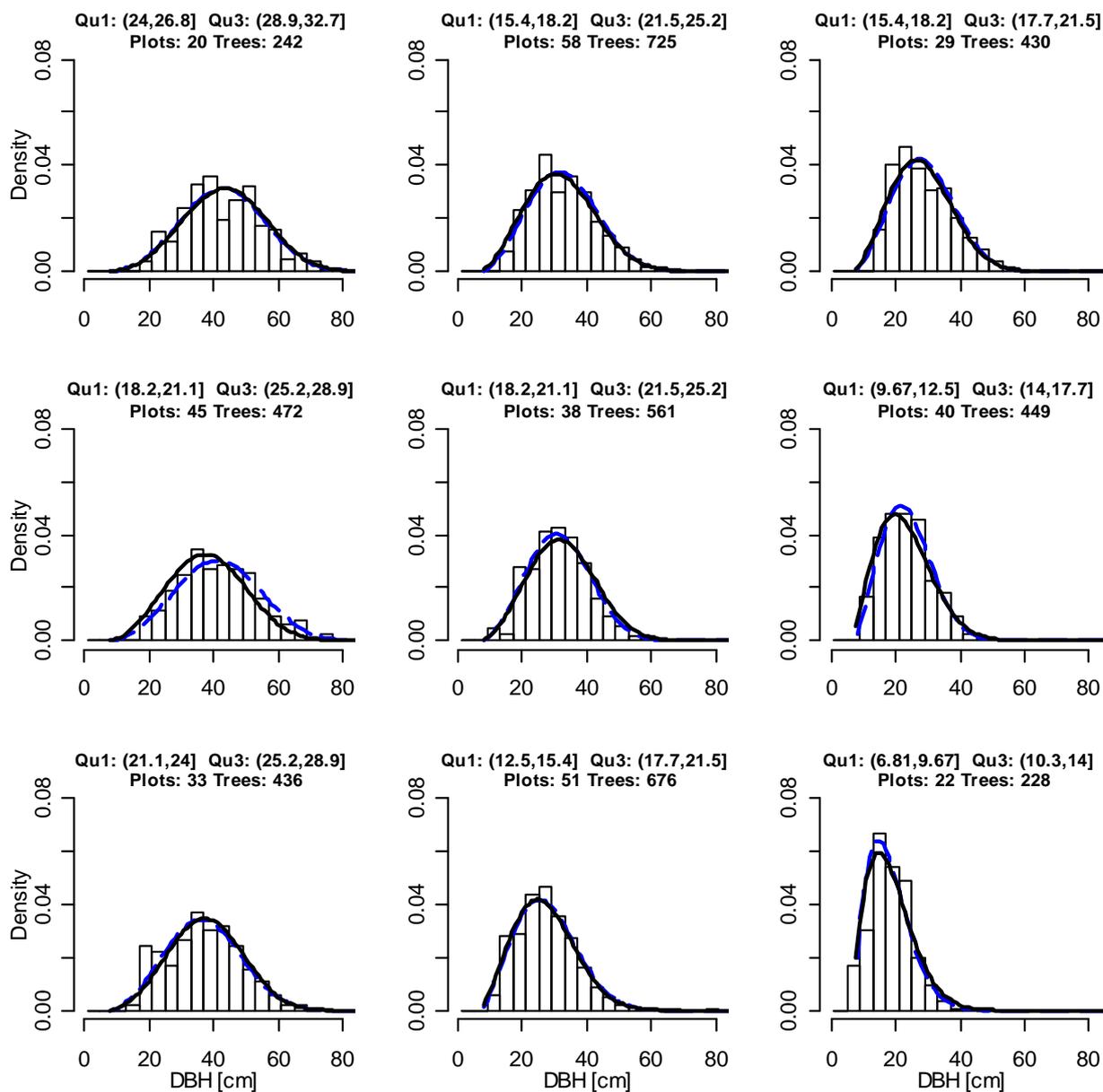
Bedeutung, um den Sortimentsanfall eines Eingriffs bestimmen zu können. Gleichzeitig ist der Durchmesser eines der wichtigsten qualitätsbestimmenden Merkmale.

An dieser Stelle wird zur Vorhersage der Verteilung der Brusthöhendurchmesser (BHD) am Inventurplot ein GAMLSS (Generalized Additive Model for Location, Scale and Shape, Rigby u. Stasinopoulos 2001) eingesetzt und die Zielgröße (BHD) als weibullverteilt angenommen. Die Anwendbarkeit der Methode wird anhand des Untersuchungsgebiets Forbach überprüft.

Als erklärende Variablen für den Skalen- und Formparameter der Weibullfunktion sind über den Vergleich von vorhergesagter und beobachteter Verteilung das erste und dritte Quartil der lasergemessenen Vegetationshöhenverteilung und deren Interaktion ausgewählt worden. Die Auswahl dieser Variablen scheint auch aus forstlicher Sicht sinnvoll zu sein, da das erste Quartil einen Punkt in der Nähe des unteren Kronenbereichs und das dritte einen Punkt in der Nähe des oberen Kronenbereichs darstellt. Somit ergibt sich aus der Kombination der beiden Variablen die Kronenmächtigkeit, die in Beziehung zum BHD steht.

Das Modell beschreibt grundsätzlich nur eine Dichteverteilung, d.h. die Struktur oder Form der Durchmesserverteilung. Um daraus eine Häufigkeitsverteilung zu generieren, die es beispielsweise ermöglicht, die Anzahl von Bäumen einer Durchmesserklasse zu berechnen, muss die Durchmesserverteilung mit einer Information wie der Grundfläche oder der Stammzahl verknüpft werden. Um die vorhergesagten und beobachteten Durchmesserverteilungen miteinander vergleichen zu können, wurde die Stammzahl als gegeben betrachtet und aus den Inventurdaten entnommen. In einer späteren Übertragung des Modells auf Flächen ohne Inventurpunkte (Regionalisierung), muss daher zusätzlich zum Modell für die Durchmesserverteilung, auch ein Modell zur Schätzung der Stammzahl oder der Grundfläche zur Verfügung stehen.

Zur Überprüfung der Modellgüte sind Inventurplots in 20 Gruppen mit ähnlichen erklärenden Variablen klassifiziert worden, um die Anzahl der Beobachtungen zu erhöhen. Die Vorhersage der Durchmesserverteilung pro Gruppe erfolgte über die nach Gruppe gemittelten erklärenden Variablen. Dadurch konnte der mittlere vorhergesagte und beobachtete Durchmesser pro Gruppe berechnet werden. Dies ergab einen RMSE von 2,44 cm und eine Verzerrung von 0,41 cm. Zur Visualisierung sind die Daten der 9 stärksten Gruppen in Abbildung 7 dargestellt.



**Abbildung 7: Beobachtete (Histogramm), vorhergesagte (schwarze, durchgezogene Linie) und direkt angepasste (blaue, gestrichelte Linie) Durchmesserverteilung an 9 Beobachtungsstraten.**

Das hier angewandte GAMLSS ist der in der Literatur bereits beschriebenen Methode, erst Verteilungen anzupassen und dann deren Parameter zu schätzen (z.B. Gobakken u. Næsset, 2004), in zweierlei Hinsicht überlegen:

Zum einen wird der gesamte Datensatz für die Schätzung der Weibullparameter herangezogen. Dies erspart einerseits die mehr oder weniger willkürliche Gruppierung der Daten und mögliche Probleme an den Verteilungsrändern, an denen trotz Gruppierung zu wenige Beobachtungen vorliegen könnten.

Zum anderen können Vorhersagen für relativ kleine Flächen gemacht werden. Bei dem kleinteiligen Waldaufbau, wie er in Mitteleuropa anzutreffen ist, stellt dies einen klaren Vorteil dar. Denn infolge der Kombination sehr verschiedener, aber in sich homogener Subeinheiten können multimodale Verteilungen entstehen, die nicht mehr mit zwei- oder dreiparametrischen Funktionen beschrieben werden können. Eine Methode, die große Flächen betrachten muss, wäre in diesem Fall nicht sinnvoll anwendbar.

### Schätzung multivariater Zielgrößen

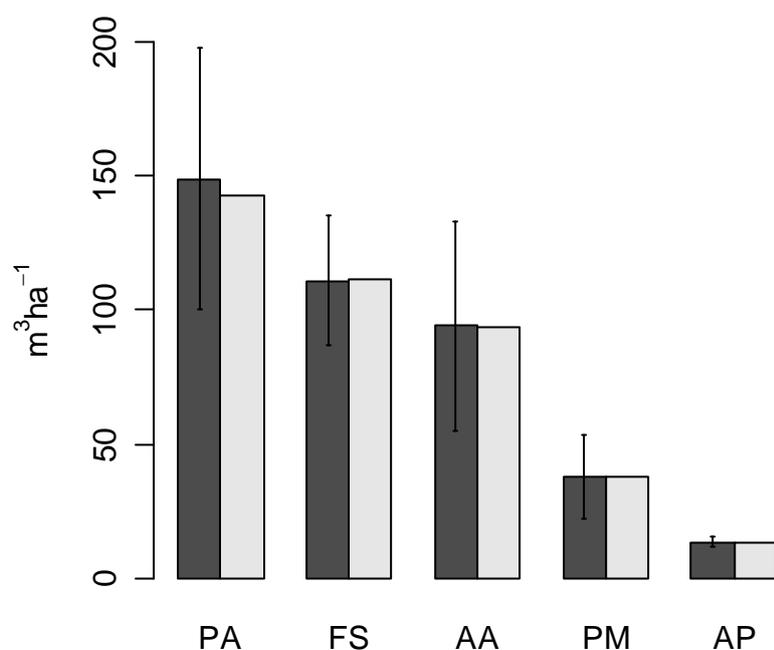
Die parametrischen Methoden haben wichtige Informationen bezüglich des Zusammenhangs zwischen Zielgrößen und erklärenden Variablen geliefert. Allerdings ist die Kombination der Modelle, z.B. um den Vorrat nach Durchmesserklassen zu schätzen, schwierig. Statt die Modelle weiterzuentwickeln, wurde zur Regionalisierung multivariater Zielgrößen, beispielsweise **Vorrat oder Durchmesserverteilungen nach Baumarten**, zunächst ein nichtparametrisches Modell eingesetzt. Dabei wurde auf das Verfahren der Random Forests (es handelt sich hierbei nur im mathematischen Sinn um Wälder) zurückgegriffen, das zu der Klasse der kNN-Methoden (k Nächste Nachbarn) gezählt werden kann. Dabei werden statt einer echten Vorhersage für eine Stelle ohne Information, die gemessenen Zielgrößen von einem Inventurpunkt, der dieser Stelle in Bezug auf die erklärenden Variablen möglichst ähnlich ist, übertragen. Dies bringt den Vorteil mit sich, dass die Kovarianzstruktur in den Daten erhalten bleibt und, theoretisch gesehen, alle gemessenen Zielgrößen auch vorhergesagt werden können. Allerdings birgt diese Methode für Werte in den Extrembereichen auch das Risiko einer Verzerrung (Bias), der auch als „Regression to the Mean Effect“ bekannt ist.

Aus Laserdaten lassen sich bislang keine Baumarten, sondern nur der Anteil laubabwerfender Baumarten bzw., als Komplement, der Anteil immergrüner Baumarten schätzen. Unter Vernachlässigung der Lärchenarten, kann dieser als Laub- bzw. Nadelbaumanteil angesehen werden. Um wenigstens in der Lage zu sein, baumartengruppenspezifische Zielgrößen zu schätzen, wurden daher terrestrische Informationen aus dem Waldbegang<sup>3</sup> mit aufgenommen. Damit liegt die Baumarteninformation zumindest grob auf Bestandesebene vor. Mit dem angepassten Modell war die Schätzung von baumartenspezifischen Zielgrößen möglich (Abbildung 8). Da

---

<sup>3</sup> Der Waldbegang ist ein Teil des Forsteinrichtungsverfahrens in Baden-Württemberg. Dabei werden im Jahr nach der Inventur unter anderem Baumartenanteile angesprochen und die weitere Bestandesentwicklung geplant.

die Baumartenerkennung die Voraussetzung dafür ist, dass die beschriebene Methodik auch in Wäldern ohne terrestrische Vorinformation eingesetzt werden kann, wird dieses Problem in einem Folgeprojekt speziell untersucht. Weitere Informationen finden sich in Breidenbach et al. (2008f).



**Abbildung 8: Beobachtete (linke Säule) und geschätzte (rechte Säule) mittlere Vorräte nach Baumarten. (PA = *Picea abies*, FS = *Fagus sylvatica*, AA= *Abies alba*, PM = *Pseudotsuga menziesii*, AP = *Acer pseudoplatanus*)**

## 2.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans

Die erzielten Forschungsergebnisse werden von der FVA als anwendungsorientierter Forschungseinrichtung der Landesforstverwaltung genutzt, um die Informationsgewinnung aus Waldinventuren zu optimieren. Mit Klärung noch offener Fragen befasst sich das internationale Vorhaben WW-IRIS, in dem insbesondere auf Holzqualitätsaspekte und die Baumartenerkennung eingegangen wird. Ein weiteres Forschungsvorhaben (FE-IRIS) hat die Integration der neuartigen Datenquellen und Modelle in die vorhandene Software- und

Datenbankstruktur zum Ziel. In beiden Projekten wird auch der Aspekt der Kostenoptimierung, z.B. durch den Einsatz verschiedener Fernerkundungsdaten, behandelt.

### **2.3 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen**

Mehrere wissenschaftliche Studien zu speziellen Fragestellungen sind während der Projektphase veröffentlicht und in den jeweiligen Forschungsarbeiten berücksichtigt worden. Eine Zusammenstellung der Studien findet sich in Breidenbach (2008).

### **2.4 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

Im Rahmen des Projektes ist eine Dissertation (Breidenbach 2008), einige Veröffentlichungen in begutachteten Fachjournalen (Breidenbach et al. 2008b-d) sowie mehrere Beiträge in Tagungsbänden (Breidenbach et al. 2006a,b, Breidenbach et al. 2007, Breidenbach, J. & Nothdurft 2008, Breidenbach et al. 2008a,g) entstanden. Zwei Beiträge in begutachteten Fachjournalen befinden sich noch in der Revisionsphase (Breidenbach et al. 2008e,f)

## **3 Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht**

### **3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms**

Siehe Dachprojekt.

### **3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen**

Der Einsatz plotweiser Verfahren unter der Verwendung von Airborne Laserscannerdaten (ALS) als Hilfsvariable hat sich auch unter mitteleuropäischen Verhältnissen als geeignete Methode heraus gestellt, um punktförmige Inventurdaten in die Fläche zu übertragen (Regionalisierung). Radardaten haben sich im Vergleich zu ALS Daten, insbesondere in stark fragmentierten Wäldern als weniger gut geeignet erwiesen.

Auch im Bezug auf die Statistische Methodik hat das Projekt wichtige Erkenntnisse ermöglicht. So haben sich gemischte Modelle als hilfreiche Methode erwiesen, zufällige Abweichungen auf Bestandesebene zu berücksichtigen. Die relativ neue Modellklasse GAMLSS wurde erstmals im forstlichen Kontext eingesetzt und ist insbesondere zur flexiblen

Schätzung von Verteilungen geeignet. Random Forests, eine ebenfalls relativ neue Methode, erwies sich als brauchbares kNN-Verfahren.

### **3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Teile der gewonnenen Erkenntnisse sind in zwei Kursen an der Universität Freiburg an Studenten vermittelt worden (6/2008 und 9/2008).

### **3.4 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer**

Neben den wissenschaftlichen Konferenzen wurden die Ergebnisse auf den einmal jährlich stattfindenden Projekttreffen mit dem Anwender- und Stakeholderpanel diskutiert. Weiterhin sind Ergebnisse auf zwei externen, speziell an Nutzer aus Forstverwaltungen gerichteten Tagungen dargestellt worden:

- Kolloquium der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg, 15.01.2008.
- Laserscanning – Ein Werkzeug für die Forsteinrichtung? Tagung in Dresden-Pillnitz, 04.03.2008.

### **3.5 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

Die Ausgabenplanung ist eingehalten worden. Lediglich bei der Zeitplanung kam es auf Grund des Todes eines Mitarbeiters zu einigen Verzögerungen die durch eine kostenneutrale Verlängerung der Projektlaufzeit um drei Monate ausgeglichen werden konnten.

#### 4 Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Rationelle und präzise Bestandesefassung  im Verbundprojekt „MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung“		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Breidenbach, Johannes Kändler, Gerald		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2008
		6. Veröffentlichungsdatum
		7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) Abteilung Biometrie und Informatik Wonnhaldestr. 4 79100 Freiburg		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen 0330616B
		11. Seitenzahl 27
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		13. Literaturangaben 25
		14. Tabellen 0
		15. Abbildungen 8
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 53170 Bonn		

## 18. Kurzfassung

Waldinventuren stellen die Basis zur Planung und Steuerung im Forstbetrieb dar. Die in Baden-Württemberg durchgeführten Stichprobeninventuren ermöglichen dabei statistisch abgesicherte Aussagen auf Betriebs- oder Stratenebene. Für die waldbauliche Planung, den Betriebsvollzug und die Erfolgskontrolle bildet jedoch nach wie vor der Bestand die Bezugseinheit. Im Rahmen der Forsteinrichtung erfolgen beim Waldbegang auf Bestandesebene jedoch keinerlei Messungen; als numerische Information werden lediglich die Baumartenanteile und gegebenenfalls das Bestandesalter gutachtlich erfasst. Ansonsten werden nur qualitative Informationen erhoben. Wegen der im Allgemeinen geringen Zahl von Betriebsinventurstichproben, die in die einzelnen Bestände fallen, können in den meisten Fällen keine ausreichend genauen Informationen über Vorrat und Vorratsstruktur sowie dendrometrische Kennwerte (z.B. Mittelhöhe, Grundfläche) bereitgestellt werden. Für die Einzelbestandsplanung bei der Forsteinrichtung sowie den Betriebsvollzug durch das örtliche Personal wären jedoch belastbare numerische Bestandeskennwerte eine wesentliche Unterstützung.

In diesem Projekt werden daher grundlegende Methoden aufgezeigt, die es ermöglichen, mit Hilfe von Fernerkundungsdaten flächendeckende Aussagen über forstliche Kenngrößen treffen zu können. Diese Übertragung punktförmiger (Stichprobeninventur) Information auf flächige Objekte wie Bestände wird im geostatistischen Sinne als Regionalisierung bezeichnet. Die entstandenen Grundlagen bilden somit eine wichtige Vorarbeit für den in Zukunft geplanten operativen Einsatz dieser Technologie. Da bereits zahlreiche Forschungsarbeiten belegen, dass sich flugzeuggetragene Laserscannerdaten (ALS) zur Vorhersage von forstlichen Parametern eignen, stellten sie die wichtigste Datenbasis für die Auswertungen in dieser Untersuchung dar. Anhand eines Beispiels, der Schätzung der Mittelhöhe, wurde ein Vergleich mit interferometrisch verarbeiteten Radardaten (InSAR) durchgeführt, aus denen ebenfalls Oberflächenmodelle erzeugt werden können und die eine mögliche Alternative darstellen.

Die elementare Methode zur Auswertung der Fernerkundungsdaten bildet der sogenannte plotweise Ansatz (area-based method), bei dem sowohl die Zielvariable, als auch die erklärenden Variablen auf der Fläche der Inventurplots aggregiert werden. Die Entscheidung zugunsten des plotweisen Ansatzes fiel unter anderem deswegen, weil diese Methode mit Laserdaten geringer Auflösung auskommt. Außerdem liegen aus Norwegen, allerdings begünstigt durch einfachere Bestandesstrukturen, bereits Erfahrungen im operationalen Maßstab vor.

Regressionsmodelle mit unterschiedlichem Komplexitätsgrad werden zur Schätzung verschiedener forstlicher Parameter eingesetzt: Bei der Schätzung von mittleren Höhen werden klassische lineare Regressionsmodelle verwendet. Das Derbholzvolumen wird über gemischte lineare Modelle vorhergesagt, bei denen sowohl die räumliche Abhängigkeitsstruktur, als auch die heteroskedastische Varianz Berücksichtigung finden. Schließlich wird zur Schätzung von Durchmesserverteilungen als weibullverteilte Zielgröße ein Generalisiertes Additives Modell für Lage, Skalenniveau und Form (GAMLSS) angepasst. Alle Regressionsmodelle zählen zu den parametrischen Verfahren, die den Vorteil bieten, dass die Koeffizienten ein Verständnis für die Wirkungsweise der erklärenden Variablen ermöglicht. Da die Modelle nur wenige und in der Regel biologisch interpretierbare unabhängige Variablen enthalten, erhöht dies die Transparenz und damit auch die Akzeptanz bei einer nachfolgenden Anwendung. Zur multivariaten Schätzung von Zielgrößen nach Baumarten wurde die nicht-parametrische Methode der RandomForests verwendet.

Als Fazit ist festzuhalten, dass sich über den Einsatz von Vegetationshöhendaten, wie sie aktive Fernerkundungssysteme bereitzustellen vermögen, viele forstliche Parameter auf Bestandesebene und zum Teil noch kleineren Flächen mit hoher Genauigkeit regionalisieren lassen. Einige kritische Kenngrößen, wie z.B. Qualität, Verbiss oder Verjüngung, standen nicht im Fokus dieser Untersuchung. Allerdings ist absehbar, dass sie sich vorerst in Mitteleuropa nur schwierig, ungenau oder garnicht aus Fernerkundungsdaten ableiten lassen. Daher kann der Einsatz von aktiven Fernerkundungsdaten in der Forstinventur aus heutiger Sicht nur in Ergänzung und zur Effizienzsteigerung der terrestrischen Inventur angesehen werden.

## 19. Schlagwörter

Regionalisierung, Waldinventur, Fernerkundung, Airborne Laser Scanning (ALS), InSAR, Upscaling, Modellierung

## 20. Verlag

## 21. Preis

## 5 Literaturverzeichnis

- ANDERSEN, H.E., MCGAUGHEY, R., REUTEBUCH, S., SCHREUDER, G., AGEE, J., MERCER, B. (2004): Estimating canopy fuel parameters in a Pacific northwest conifer forest using multifrequency polarimetric IfSAR. In: XXth ISPRS Congress. Istanbul, Turkey.
- BÖSCH, B. (1995): Ein Informationssystem zur Prognose des künftigen Nutzungspotenzials. *Forst und Holz* 50: 587 - 593
- BREIDENBACH, J. (2008): Regionalisierung von Waldinventuren mittels aktiver Fernerkundungstechniken. Dissertation, Universität Freiburg, Fakultät für Forst- und Umweltwissenschaften.
- BREIDENBACH, J., KOCH, B., KÄNDLER, G., KLEUSBERG, A. (2006): Comparison of Lidar and InSAR data to estimate tree height in forest inventories. In KOUKAL, T., SCHNEIDER, W. (eds.), Workshop on 3D Remote Sensing in Forestry.
- BREIDENBACH, J., SCHMIDT, M., KÄNDLER, G. (2006): Schätzung von oberirdischen Biomassevorräten aus Flugzeuggetragenen Laserscannerdaten. In DEGENHARDT, A., WUNN, U. (Hg.), 18. Tagung der Sektion Forstliche Biometrie und Informatik im deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten, 25.-27. September 2006
- BREIDENBACH, J., MCGAUGHEY, R., ANDERSEN, H., KÄNDLER, G., REUTEBUCH, S. (2007): A mixed-effects model to estimate stand volume by means of small footprint airborne lidar data for an American and a German study site. In RÖNNHOLM, P., HYYPPÄ, H., HYYPPÄ, J. (eds.), ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007
- BREIDENBACH, J., GLÄSER, C., SCHMIDT, M., (2008a): Diameter distribution modelling using ALS. In: proceedings of the SilviLaser conference 2008, 17th - 19th September 2008, Edinburgh, United Kingdom.
- BREIDENBACH, J., GLÄSER, C., SCHMIDT, M., (2008b): Estimation of diameter distributions by means of airborne laser scanner data. *Canadian Journal of Forest Research, NRC Research Press* 38: 1611 - 1620
- BREIDENBACH, J.; KOCH, B.; KÄNDLER, G. & KLEUSBERG, A. (2008c): Quantifying the influence of slope, aspect, crown shape and stem density on the estimation of tree height at plot level using Lidar and InSAR data. *International Journal of Remote Sensing* 29: 1511-1536
- BREIDENBACH, J.; KUBLIN, E.; MCGAUGHEY, R.; ANDERSEN, H. & REUTEBUCH, S. (2008d): Mixed-effects models for estimating stand volume by means of small footprint airborne laser scanner data. *Photogrammetric Journal of Finland* 21: 4-15
- BREIDENBACH, J.; MCGAUGHEY, R.; ANDERSEN, H.; KÄNDLER, G. & REUTEBUCH, S. (2008e): Assessing the Influence of horizontal location errors in Sample Plots on Forest Inventories using Airborne Laser Scanner Data. *European Journal of Forest Research*, (submitted).
- BREIDENBACH, J.; NOTHDURFT, A., KÄNDLER, G. Upscaling Forest Structural Parameters Based On Als Using Random Forests. *European Journal of Forest Research*, 2008f. (in revision).

- BREIDENBACH, J., NOTHDURFT, A. (2008g): Estimating forest parameters using random forests. In HAHN, A.; KNOKE, T. & SCHNEIDER, T. (eds.), Proceedings of the IUFRO Conference Linking Forest Inventory and Optimization, 1 - 4 April, Weihenstephan.
- BREIDENBACH, J., SCHMIDT, M., KÄNDLER, G. (2006): Schätzung von oberirdischen Biomassevorräten aus Flugzeuggetragenen Laserscannerdaten. In DEGENHARDT, A. ; WUNN, U. (Hg.): 18. Tagung der Sektion Forstliche Biometrie und Informatik im deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten, 25.-27. September, Trippstadt.
- GOBAKKEN, T., NAESSET, E (2004): Estimation of diameter and basal area distributions in coniferous forest by means of airborne laser scanner data. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19, Nr. 6: 529–542
- HRADETZKY, J. (2001) Der Staatswald Baden-Württemberg im Spiegel der Erhebung Waldwachstum 1999. Jahresbericht 2000 der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg: 9-12
- KÄNDLER, G., BÖSCH, B. (2002): Die Betriebsinventur als Grundlage für Planung, Steuerung und Kontrolle des Forstbetriebs. FVA-Forschungstage, 5.-6. Juli 2001 Freiburger Forstliche Forschung Band 18: 252-265
- KÄNDLER, G., SCHMIDT, M., BÖSCH, B., BREIDENBACH, J. (2004): Wesentliche Ergebnisse der zweiten Bundeswaldinventur sowie Abschätzung künftiger Nutzungsmöglichkeiten (vorläufiger Bericht zur verwaltungsinternen Information in Baden-Württemberg, unveröffentlicht).
- NAESSET, E., GOBAKKEN, T., HOLMGREN, J., HYYPPÄ, H., HYYPPÄ, J., MALTAMO, M., NILSSON, M., OLSSON, H., PERSSON, Ä., SÖDERMAN, U. (2004): Laser scanning of forest resources: the nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19, Nr. 6: 482–499
- NAESSET, E. (2004): Accuracy of forest inventory using airborne laser scanning: evaluating the first Nordic full-scale operational project. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 554–557
- NAESSET, E. (2004): Practical large-scale forest stand inventory using a small-footprint airborne scanning laser. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19, Nr. 2: 164-179
- PERSSON, A., HOLMGREN, J., SÖDERMAN, U. (2002): Detecting and measuring individual trees using an airborne laser scanner. In: *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 68, Nr. 9: 925-932
- RIGBY, R.A., STASINOPOULOS, D.M. (2001): The GAMLSS project: a flexible approach to statistical modelling. In *New Trends in Statistical Modelling: 16th International Workshop on Statistical Modelling*: 337–345
- SCHMIDT, M., BAYER, J., KÄNDLER, G. (2005): Sturm Lothar – Ansatz einer inventurbasierten Risikoanalyse. FVA-Einblick 2, Eigenverlag.
- SCHÖPFER, W. (1998): Schritte zu einem Informationssystem für HOLZERNTEN und Holzvermarktung. *Forst und Holz* 53: 379-387

# Teilprojekt 1: Rationelle und präzise Bestandeserfassung

Institut für Waldwachstum

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

## Abschlussbericht

---

Zuwendungsempfänger: Institut für Waldwachstum, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	Förderkennzeichen: 0330616A
--	--------------------------------

---

Vorhabenbezeichnung:

MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung

Teilprojekt 1: Rationelle und präzise Bestandese Erfassung

Frank Wandhofer

---

Laufzeit des Vorhabens:

1. September 2005 bis 31. Dezember 2008

---

Berichtszeitraum:

1. September 2005 bis 31. Dezember 2008

---

## **MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung**

### **Teilprojekt 1: Rationelle und präzise Bestandese Erfassung**

Frank Wandhofer

Institut für Waldwachstum, Universität Freiburg

Freiburg, Juni 2009

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Kurze Darstellung des Teilvorhabens</b>	<b>95</b>
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	95
1.2	Vorraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	95
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	96
1.4	Wissenschaftliche und technische Anknüpfung	96
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	96
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>97</b>
2.1	Erreichte Ergebnisse	97
2.1.1	Arbeitspaket 6: Kombination verschiedener Inventurverfahren	97
2.1.2	Arbeitspaket 7: Auswertung von terrestrischen Laserscanningdaten auf Stichprobenbasis	108
2.1.3	Arbeitspaket 8: Einschätzung der Nutzholzausbeute	114
2.1.4	Arbeitspaket 9: Dynamisierung	117
2.1.5	Zusammenfassung der Ergebnisse des IWW	123
2.1.6	Ausblick	123
2.2	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans	124
2.3	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	124
2.4	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	125

---

<b>3</b>	<b>Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht</b>	<b>125</b>
3.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	125
3.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen	126
3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	126
3.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	126
3.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)	126
3.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	127
<b>4</b>	<b>Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)</b>	<b>127</b>
<b>5</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>129</b>
<b>6</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>130</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>130</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>131</b>

# 1 Kurze Darstellung des Teilvorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Da die Nachhaltigkeit in den letzten Jahren in Wirtschaft und Kultur verstärkt in den Fokus rückt, ist eine optimierte Bewirtschaftung des Waldes mit dem Blickpunkt auf die gesellschaftlichen Bedürfnisse unumgänglich. Um eine optimale Bewirtschaftung des Waldes zu erreichen, ist es unerlässlich genaue Informationen zu dem derzeitigen Ist-Zustand zu besitzen. Bei der Erfassung des Ist-Zustandes bei Wäldern ist die große flächenmäßige Ausdehnung des Waldes als wichtiger Faktor zu betrachten. Eine komplette Aufnahme des gesamten Bestandes ist finanziell und zeitlich als nicht realisierbar einzustufen, aus diesem Grund werden Inventurverfahren angewandt, die aus Stichprobenergebnissen resultieren. Ziel ist es Verfahren zu entwickeln, die eine genauere Benennung des Ist-Zustandes ermöglichen, damit Fragen, die sich bei der Veränderung des Holzmarktes sowie bei den neu entwickelten Betriebsformen ergeben, spezifisch beantwortet werden können.

Um diesen Ist-Zustand möglichst genau zu bestimmen, können terrestrische Laserscanaufnahmen verwendet werden. Ein besonderer Aspekt ist hierbei, dass die holzmarktrelevanten Informationen zu Schaftform, Dimension und Qualität der Bäume bestimmt werden können. Mit Hilfe dieser Daten lassen sich spezielle Fragen des Holzmarktes individuell beantworten, was mit den sich im Einsatz befindlichen Inventurverfahren nicht zu realisieren ist.

Ziel des Projektes ist es, über möglichst objektive automatisierte Auswerteverfahren Daten zur Qualität und zur räumlichen Verteilung des Holzvorrates bereitzustellen. Diese Informationen sollen so erhoben werden, dass der Holzindustrie eine ausreichende Genauigkeit für die zu bestimmenden Holzdaten zur Verfügung steht und sie nicht auf die zum Teil nicht ausreichenden Stichprobeninventuren angewiesen ist. Ein weiterer Aspekt betrifft die Kleinprivatwaldbesitzer und die Zusammenschlüsse in Forstbetriebsgemeinschaften, die mit Hilfe dieser qualitativen Bestimmung des Nutzholzes ihren Holzbestand besser einschätzen und verkaufen können. Ziel ist es des Weiteren auch auf dem internationalen Holzmarkt einen direkten Zugriff auf objektive Daten der Holzbestände zu ermöglichen und somit einen bedarfsgerechten Informationsaustausch zu realisieren.

## 1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

- Projektleiter für das Teilprojekt 1: Ressource – Rationelle und präzise Bestandese Erfassung (IWW)
- ein Projektbearbeiter für die Arbeitspakete 6 bis 9 (AP 6: Kombination verschiedener Inventurverfahren, AP7: Auswertung von terrestrischen Laserscanning-Daten auf Stichprobenbasis, AP8: Einschätzung der Nutzholzausbeute, AP9: Dynamisierung)
- Anleitung von wissenschaftlichen Hilfskräften
- Nutzungsvereinbarungen und –rechte regelten die Verfügbarkeit und Verwendung der erwähnten Datenquellen

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Vorhaben konnte sowohl zeitlich als auch inhaltlich weitgehend entsprechend der Planung in der Projektbeschreibung umgesetzt werden, auf deren Grundlage der Zuwendungsbescheid erstellt wurde. Die Projektlaufzeit wurde um 4 Monate verlängert, da tragischerweise während der Projektlaufzeit ein für den Projektfortschritt, insbesondere für gemeinsame Datenhaltung und Datenverarbeitung, entscheidender Mitarbeiter (Herr Jürgen Bayer) verstorben ist, wodurch es zu einer deutlichen Verzögerung gekommen ist.

### **1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfung**

Das Forschungsvorhaben umfasst die Erarbeitung innovativer Techniken für die Bereitstellung von Waldinformationen, hierbei ist es das erklärte Ziel des Instituts für Waldwachstum Informationen für festgelegte Stichproben hochpräzise zu erfassen und zu analysieren.

Im BMBF-Projekt Natscan wurde bewiesen, dass die Auswertung von terrestrischen Laserscandaten zur Bestimmung von forstlichen Inventurparametern möglich ist. Es sollte im Zuge dieses Projektes ein Vergleich der durch terrestrische Laserscandaten erfassten Inventurparameter und der herkömmlichen gutachterlichen Verfahren durchgeführt werden. Neben der Erfassung von geometrischen Qualitätsparametern war es ein weiteres Ziel, diese Informationen aufzubereiten um anhand dieser Daten Berechnungen zur Nutzholzausbeute zu realisieren. Mit Hilfe dieser Informationen und den herkömmlich erfassten Daten soll eine Grundlage geschaffen werden um die Holzbestände zu regionalisieren und zu dynamisieren.

### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Zusammenarbeit mit anderen Stellen erfolgte vor allem projektintern mit den Forschungspartnern der Universität Freiburg und der Forstlichen Versuch- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.

## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Erreichte Ergebnisse

#### 2.1.1 Arbeitspaket 6: Kombination verschiedener Inventurverfahren

##### 2.1.1.1 Ziele

Ziel dieses Arbeitspaketes war es, die mit Hilfe terrestrischer Laserscanning-Methoden ermittelten Merkmale mit denen aus herkömmlichen Inventurmethode ermittelten Parametern zu kombinieren. Informationen aus verschiedenen Methoden gehen in die Bildung der Stichproben ein, die die forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt für die Regionalisierung der terrestrischen Daten benötigt, die im Rahmen dieses Projektes durchgeführt wird. Dabei ist davon auszugehen, dass Informationen zur Einschätzung der Nutzholzausbeute nur aus den terrestrischen Laserscanning-Daten erfasst werden können. Durch Definition der entsprechenden Schnittstellen lassen sich die verwendeten Parameter aus den herkömmlichen Verfahren mit den mit Hilfe von Laserscanning-Techniken ermittelten Merkmalen kombinieren. Die so ermittelten Parameter führen auf diese Weise zu einer verbesserten Wertschöpfung.

Um dieses Vorhaben zu realisieren ist es notwendig, entsprechende Testgebiete festzulegen. Diese sind mit der Abteilung Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme der Universität Freiburg sowie mit der Abteilung Biometrie und Informatik der Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg abzustimmen.

##### 2.1.1.2 Ergebnisse

###### Konzept:

Um die Laserscanning-Daten mit den Daten, die bei der herkömmlichen Inventurmethode gewonnen wurden, zu vergleichen, wurden exemplarisch verschieden strukturierte Stichprobenflächen bestimmt. Diese Stichprobenflächen wurden so ausgewählt, dass eine Aussage zur Genauigkeit und zur Informationsdichte der Daten des Laserscanners bestimmt werden kann. Im ersten Schritt wurde das Ziel verfolgt, festzustellen, wie sich die händischen Inventurdaten und die lasergestützt erfassten Inventurdaten kombinieren lassen. Um jedoch diese Daten miteinander zu verschmelzen, ist es notwendig, die Daten vorher miteinander zu vergleichen, um eventuelle Fehler aufzudecken und systematische Ungenauigkeiten zu erkennen und ein effektives Arbeiten mit den unterschiedlichen Verfahren anhand dieser Erkenntnisse zu realisieren.

Bei den Versuchsflächen, die zur Bestimmung dieser Parameter genutzt wurden, wurde der Schwerpunkt auf die bestehenden Mischbestände gelegt, um die Aussagen zu den verschiedenen bestimmbar Genauigkeiten möglichst präzise zu parametrisieren. Bei der Auswertung wurden verschiedene Ansätze zur Parameterbestimmung verfolgt. Um möglichst

klar bestimmbare Messdaten zu verwenden, wurde sich darauf geeinigt, vorrangig den BHD sowie den Durchmesser in 7 m Höhe als Vergleichswerte zu verwenden.

Versuche, die verschiedenen Astdicken miteinander zu vergleichen, haben sich als sehr schwierig dargestellt, da zwischen den Laserscan-Aufnahmen und den manuellen Messungen ein Zeitabstand von mehreren Monaten lag, und Probleme bei der Identifikation der einzelnen Äste auftraten. Bei den gemessenen Totästen ist nur näherungsweise ein Parameter anhand der manuell bestimmten Daten im Laserscan zu ermitteln, da hier Faktoren wie Verdeckung, Rindenstruktur und Auftreffwinkel eine ergebnisorientierte Auswertung nicht zulassen.

## **Ansätze**

Die drei Ansätze, die anhand der gemessenen Daten zu verfolgen sind, sind folgende:

- Ansatz 1a: Bestimmung von Genauigkeitsparametern anhand der Entfernung der Bäume zum Scanner, kurz: BHD-Vergleich-Entfernung
- Ansatz 2a: Bestimmung von Genauigkeitsparametern anhand des Durchmessers der Bäume, kurz: BHD-Vergleich-Durchmesser
- Ansatz 3a: Bestimmung von Genauigkeitsparametern anhand der verschiedenen Baumarten, kurz: BHD-Vergleich-Baumart

Bei allen drei Ansätzen ist darauf geachtet worden, dass der Durchmesser des Baumes immer exakt in der Höhe 1,30 m über Boden und in einer Flucht zum Standpunkt des Laserscanners gemessen wurde, somit konnten Ungenauigkeiten wie die Ovalität der Bäume direkt bei der händischen Aufnahme eliminiert werden.

Bei der Auswertung wurden die Vergleichsgrößen einmal relativ (%) zum jeweiligen Bestimmungsparemetern ausgewertet und einmal als Absolutwert (cm) bestimmt.

Neben der Auswertung des BHD wurden die Ansätze auch in einer Höhe von 7 m bzw. in einer Höhe von 5 m vorgenommen. (Die Bestimmung des Durchmessers auf einer Höhe von 5 m erfolgte dann, wenn es nicht möglich war, mit dem Sicherungsgurt eine Höhe von 7 m zu erreichen.) Diese Ansätze werden im Folgenden kurz bezeichnet als:

Ansatz 1b: Di7m-Vergleich-Entfernung

Ansatz 2b: Di7m-Vergleich-Durchmesser

Ansatz 3b: Di7m-Vergleich-Baumart

Ein besonderer Faktor, der hierbei zu beachten ist, ist der, dass bei diesen Messungen sehr steile Visuren (geringer Zenitwinkel) eingesetzt werden um die gewünschten Werte zu bestimmen.

Im Folgenden werden die verschiedenen ausgewerteten Daten visuell dargestellt, des Weiteren ist die mittlere Genauigkeit der jeweiligen Messung aufgeführt. Alle Messdaten sind nach Plot sortiert auch ausführlich im Anhang (BHD\_Di7m\_Baumart\_Entfernung.xls) zu betrachten. Im Anschluss der Darstellung wird auf die verschiedenen Ansätze und die daraus resultierenden Ergebnisse eingegangen.

Bei den Prozentwerten wird der händische Wert als die 100% Marke angenommen und die durch den Laserscanner ermittelten Daten werden im Bezug auf diesen Idealwert angegeben.

Bei den cm-Werten wird der händisch gemessene Wert als richtig angenommen und die Laserdaten werden im Bezug zu diesem angegeben. Zum besseren Vergleich mit den Prozentwerten werden hier die händisch ermittelten Daten von den Laserscanningdaten abgezogen.

Ansatz 1a: BHD-Vergleich-Entfernung

Tabelle 1: Ansatz 1a: BHD-Vergleich-Entfernung

Bestimmung des Durchmessers Entfernungsabhängig % mittlere Genauigkeit				Bestimmung des Durchmessers Entfernungsabhängig cm mittlere Genauigkeit			
0- 5m	5- 7.5m	7.5- 10m	10- 12.5m	0- 5m	5- 7.5m	7.5- 10m	10- 12.5m
96.41	97.77	96.29	96.55	-1.32	-0.69	-0.79	-0.90

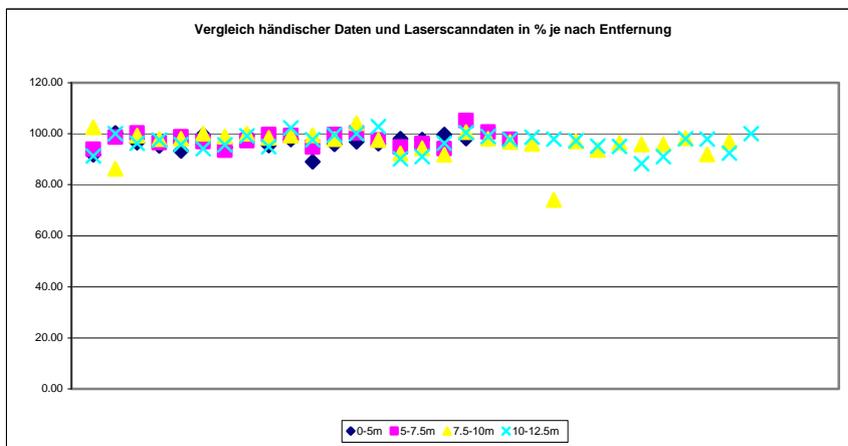


Abbildung 1: Vergleich händischer Daten und Laserscannaten in % je nach Entfernung

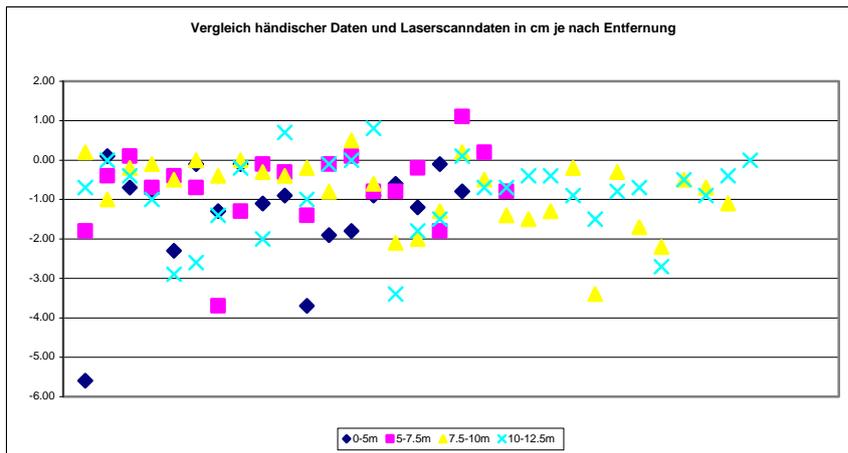


Abbildung 2: Vergleich händischer Daten und Laserscandaten in cm je nach Entfernung

In diesem Ansatz wurde eine Auswertung anhand der Entfernung der Bäume zum Laser-scanner vorgenommen. Hierbei wurde keine Unterscheidung zwischen den verschiedenen Baumarten oder der jeweiligen Dicke der Bäume getroffen.

Aufgrund der relativen Werte (96,41% - 97,77%) bzw. absoluten Werte (-1,32 cm - -0,69 cm) lässt sich kein Schema erkennen, das auf eine unterschiedliche Genauigkeit des Laserscanners im Bezug auf die Entfernung der Bäume schließen lässt. Im Bereich zwischen 0-5 m ist ein Ausreißer dabei, der den absoluten Wert der mittleren Genauigkeit ungenau erscheinen lässt, leider lässt sich nicht rekonstruieren, warum es zu diesem Ausreißer in der Aufnahme gekommen ist. Die durchgehende Unterschätzung des Durchmessers durch die Laserscanningaufnahme lässt auf eine tendenziell genaue und richtige Aufnahme schließen, da die Laserscanningaufnahme zeitlich vor der händischen geschah.

Ansatz 2a: BHD-Vergleich-Durchmesser

Tabelle 2: Ansatz 2a: BHD-Vergleich-Durchmesser

Bestimmung des Durchmessers Durchmesserabhängig % mittlere Genauigkeit				Bestimmung des Durchmessers Durchmesserabhängig cm mittlere Genauigkeit			
< 15cm	15- 30cm	30- 45cm	> 45cm	< 15cm	15- 30cm	30- 45cm	> 45cm
96.39	97.46	96.92	96.28	-0.28	-0.57	-1.11	-2.09

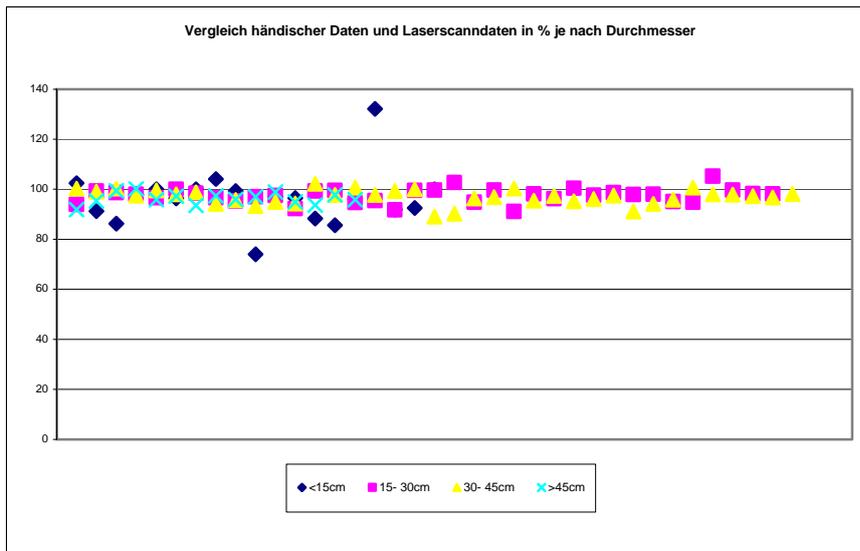


Abbildung 3: Vergleich händischer Daten und Laserscandaten in % je nach Durchmesser

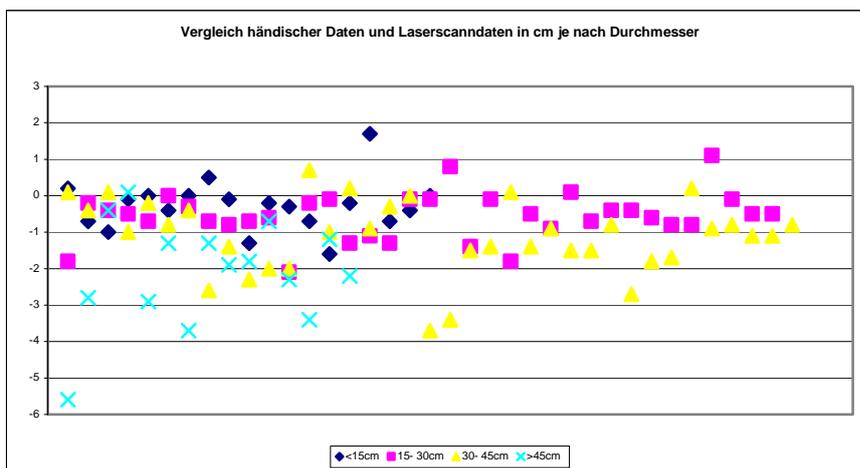


Abbildung 4: Vergleich händischer Daten und Laserscandaten in cm je nach Durchmesser

Im zweiten Ansatz wurden die Daten anhand der Durchmesser der Bäume selektiert und ausgewertet.

Bei den relativen Werten (96,28% - 97,46%) lassen sich keine Besonderheiten feststellen, die Werte werden systematisch vom Laserscanner unterschätzt, was auf den zeitlichen Unterschied der Aufnahmen zurückzuführen ist.

Bei den absoluten Werten (-2,09 cm - -0,28 cm) ist zu erkennen, dass mit zunehmender Dicke des Durchmessers auch die Ungenauigkeit zunimmt, bzw. der Unterschied zu den händisch gemessenen Daten. Erster Erklärungsansatz war der, dass mit zunehmendem Alter der Bäume auch der Zuwachs stärker ist. Jedoch sind Werte von durchschnittlich 2,09 cm Zuwachs pro Jahr bei diesen Baumarten, auch bei Bäumen die einen größeren Durchmesser als 45 cm haben, unwahrscheinlich. Der zweite Erklärungsansatz ist der, dass die Porosität der Rindenstruktur bei zunehmendem Alter zunimmt. Die Porosität von Materialien wird bei vielen Publikationen als ein großer Faktor bei den Parametern, die zu Ungenauigkeiten bei Laserscanningaufnahmen führen, aufgeführt.

## Ansatz 3a: BHD-Vergleich-Baumart

Tabelle 3: Ansatz 3a: BHD-Vergleich-Baumart

Bestimmung des Durchmessers Baumartenabhängig % mittlere Genauigkeit				Bestimmung des Durchmessers Baumartenabhängig cm mittlere Genauigkeit			
Buche	Douglasie	Tanne	Fichte	Buche	Douglasie	Tanne	Fichte
96.31	97.59	97.17	97.40	-0.94	-1.48	-0.66	-0.88

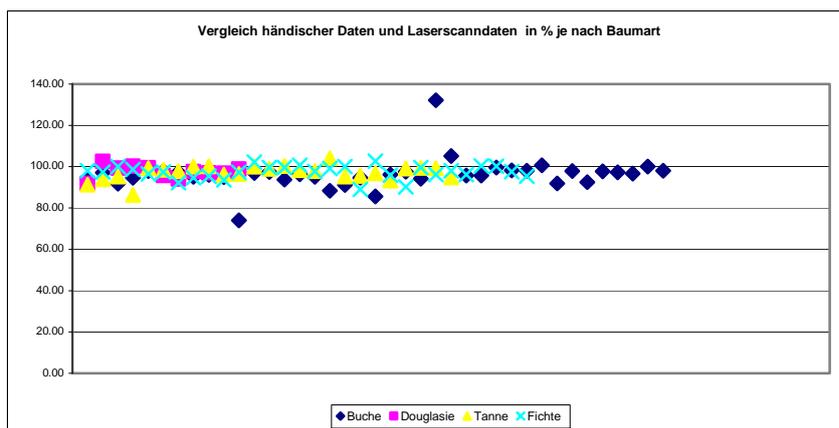


Abbildung 5: Vergleich händischer Daten und Laserscandaten in % je nach Baumart

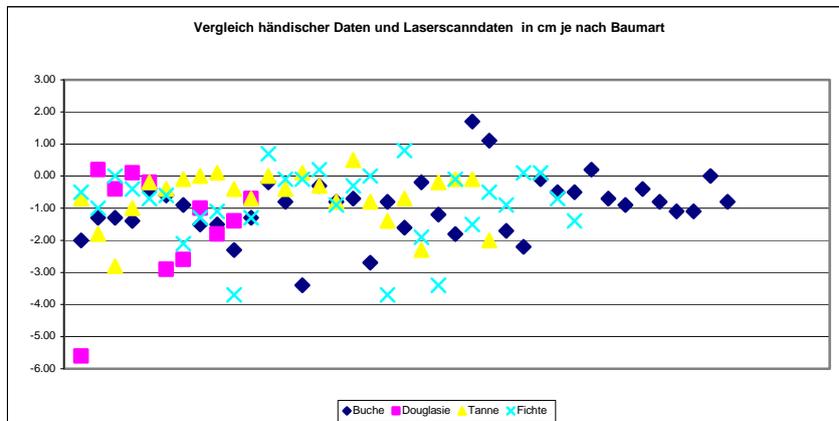


Abbildung 6: Vergleich händischer Daten und Laserscandaten in cm je nach Baumart

Im dritten Ansatz wurden die aufgenommenen Bäume nach den Baumarten sortiert und ausgewertet.

Bei den relativen Werten (96,31% - 97,59%) lassen sich keine Besonderheiten feststellen, die Werte werden systematisch vom Laserscanner unterschätzt, was wieder auf den zeitlichen Unterschied der Aufnahmen zurückzuführen ist.

Bei den absoluten Werten (-1,48 cm - -0,66 cm) ist, wie zu erwarten war, zu erkennen, dass die Douglasie den stärksten Zuwachs hatte.

Ansatz 1b: Di7m-Vergleich-Entfernung + Ansatz 2b: Di7m-Vergleich-Durchmesser

Tabelle 4: Di7m-Vergleich-Entfernung

Bestimmung des Durchmessers Entfernungsabhängig % mittlere Genauigkeit				Bestimmung des Durchmessers Entfernungsabhängig cm mittlere Genauigkeit			
0-5m	5- 7.5m	7.5-10m	> 10m	0-5m	5-7.5m	7.5-10m	> 10m
-	90.75	88.31	88.05	-	-2.74	-2.89	-4.60

Tabelle 5: Di7m-Vergleich-Durchmesser

Bestimmung des Durchmessers Durchmesserabhängig % mittlere Genauigkeit				Bestimmung des Durchmessers Durchmesserabhängig cm mittlere Genauigkeit			
< 15cm	15-30cm	30-45cm	> 45cm	< 15cm	15-30cm	30-45cm	> 45cm
-	88.48	88.75	89.76	-	-2.63	-3.87	-5.50

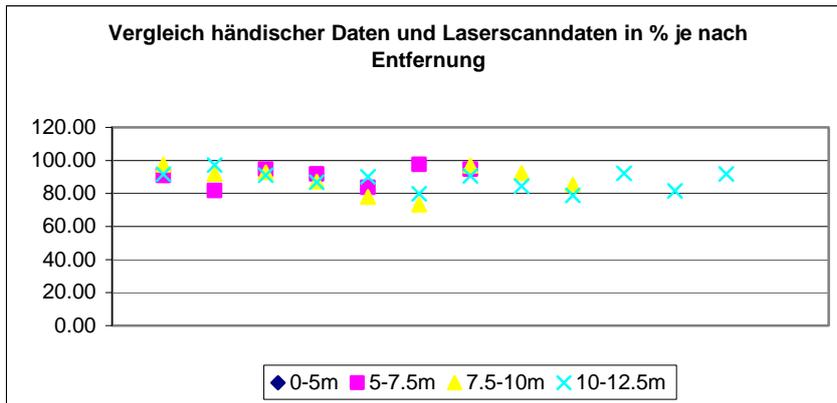


Abbildung 7: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in % je nach Entfernung

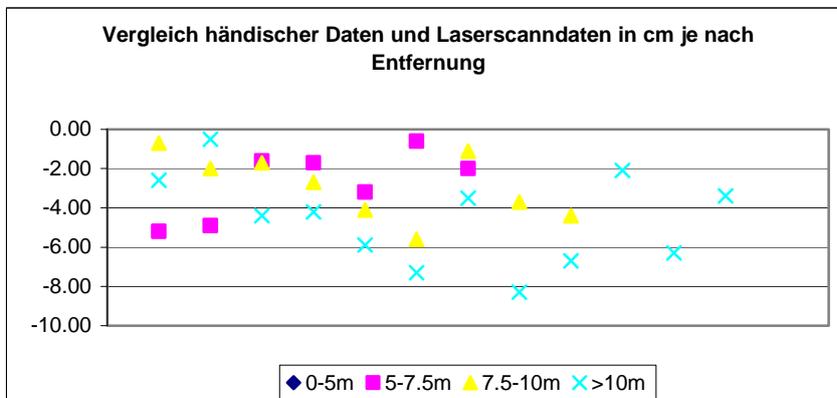


Abbildung 8: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in cm je nach Entfernung

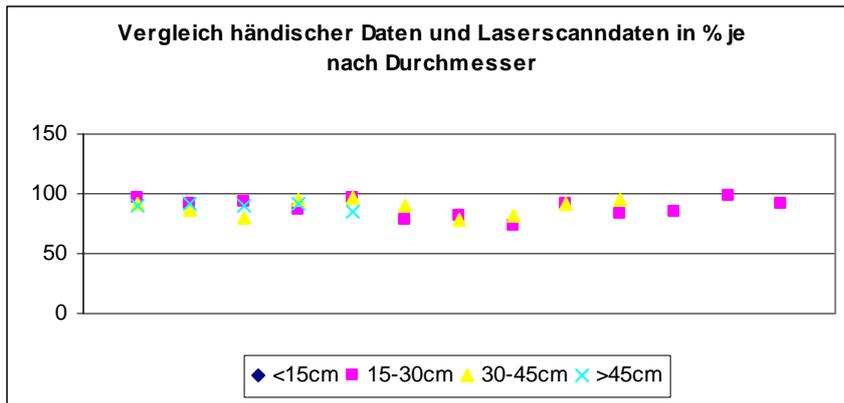


Abbildung 9: Vergleich händischer Daten und Laserscandaten in % je nach Durchmesser

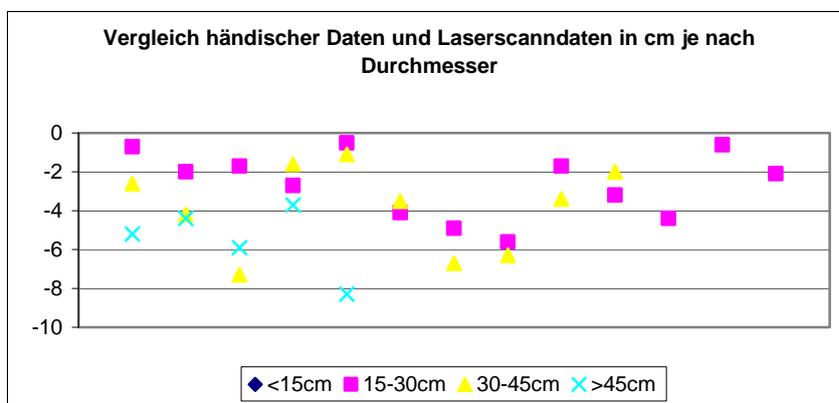


Abbildung 10: Vergleich händischer Daten und Laserscandaten in cm je nach Durchmesser

Bei beiden Ansätzen fällt die hohe Abweichung der Laserscanningdaten von den händisch vermessenen Daten auf, relativ beträgt der Unterschied bei der mittleren Genauigkeit bis zu 12%. Bei den absoluten Werten ist eine Abweichung von bis zu 4,6 cm (Di7m-Vergleich-Entfernung; mittlere Genauigkeit >10 m) bzw. von bis zu 5,5 cm (Di7m-Vergleich-Durchmesser; mittlere Genauigkeit >45 cm) vorhanden.

Im Verhältnis zu den vergleichbaren BHD-Werten sind diese Abweichungen enorm. Es ist davon auszugehen, dass die ungünstigen Aufnahmeparameter (geringer Zenitwinkel, und Porosität der Baumrinde und die daraus resultierende schlechte Reflektivität) im Zusammenspiel für diese schlechten Ergebnisse verantwortlich sind.

Ansatz 3b: Di7m-Vergleich-Baumart

Tabelle 6: Di7m-Vergleich-Baumart

Bestimmung des Durchmessers Baumartenabhängig % mittlere Genauigkeit				Bestimmung des Durchmessers Baumartenabhängig cm mittlere Genauigkeit			
Buche	Douglasie	Fichte	Tanne	Buche	Douglasie	Fichte	Tanne
89.48	88.27	90.95	87.64	-3.52	-5.31	-2.02	-2.97

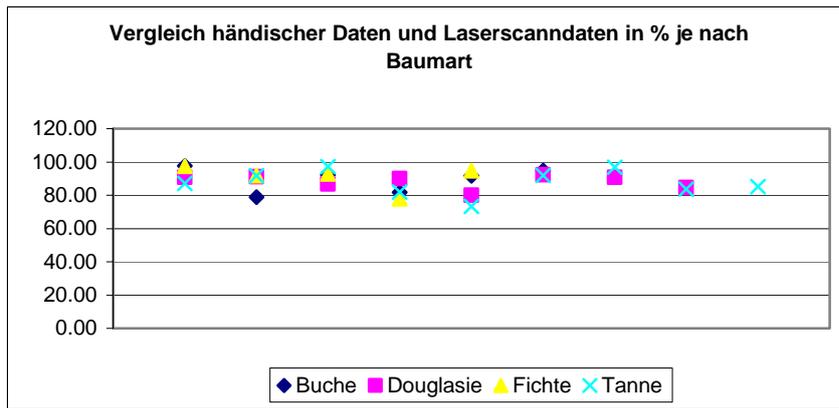


Abbildung 11: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in % je nach Baumart

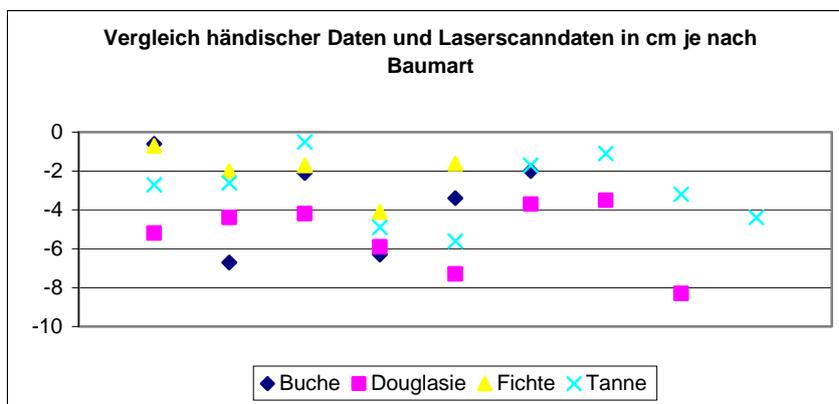
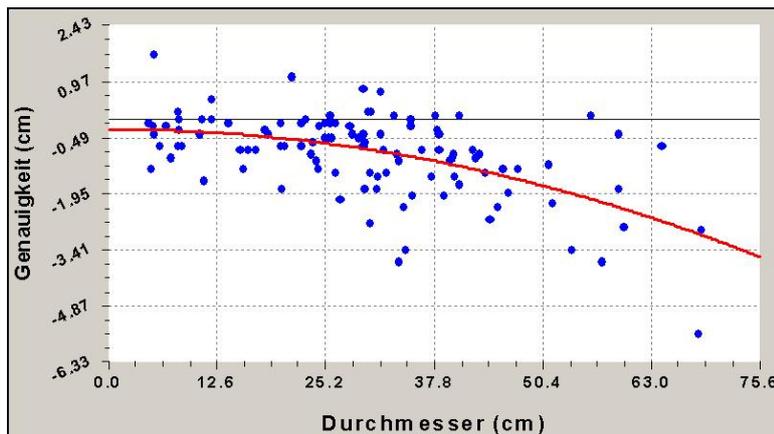


Abbildung 12: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in cm je Baumart

Wie auch in den Ansätzen zuvor ist der Unterschied der mittleren Genauigkeit der relativen Werte hier sehr hoch, mit Abweichung von bis zu 12%. Bei den absoluten Werten der mittleren Genauigkeit ist wieder zu erkennen, dass die Douglasie den größten Zuwachs hatte. Jedoch sind die Abweichungen auch hier so hoch, dass sie sich nicht anhand von Erfahrungswerten erklären lassen. Als Ursache für diese hohen Abweichungen werden wiederum die ungünstigen Aufnahmeparameter (geringer Zenitwinkel und Porosität der Baumrinde und die daraus resultierende schlechte Reflektivität) verantwortlich gemacht.

### 2.1.1.3 Erkenntnisse



Quadratische Funktion:

$$y = a + bx + cx^2$$

$$a = -0,27467654$$

Abbildung 13: Abhängigkeit des Durchmessers zur Genauigkeit

Bei der Kombination von händisch und terrestrisch bestimmten Inventurdaten ist zu unterscheiden, ob es sich um eine Flächen-Analyse handelt, oder ob eine Einzelbaum-Analyse durchgeführt werden soll.

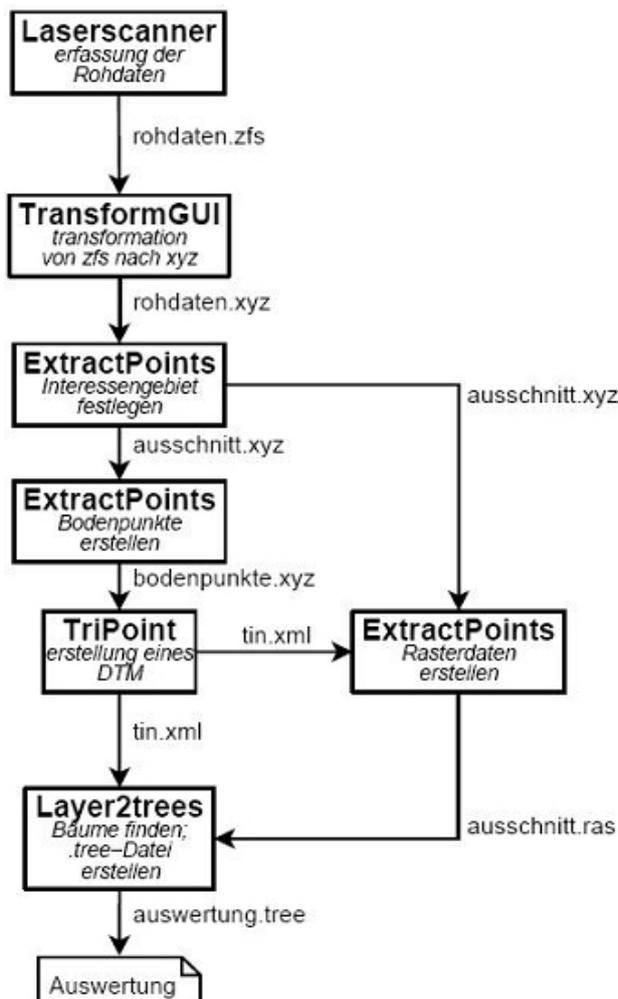


Abbildung 14: Datenverarbeitungsablauf

Bei großen Beständen lassen sich Informationen wie Durchmesser in verschiedenen Höhen sowie die Kronenansatzhöhe automatisch bestimmen, dieser Vorgang ist jedoch in der Datenverarbeitung auf eine hohe Ressourcenauslastung des Rechners angewiesen und somit zeitlich sehr aufwendig.

Der Datenverarbeitungsablauf wird wie folgt realisiert:

Dem Ablaufdiagramm (siehe linke Abbildung) kann man entnehmen, in welchem Eingabeformat (Pfeilbeschriftung) die Daten verarbeitet werden und welches das Ausgabeformat ist.

Hierbei wird deutlich, dass dieser Ablauf viele Ressourcen des Rechners in Anspruch nimmt, da jeder Formatwechsel rechenintensiv ist.

Des Weiteren steht in jeder Anweisung der Programmname und die Funktion, die vom jeweiligen Programm ausgeführt wird.

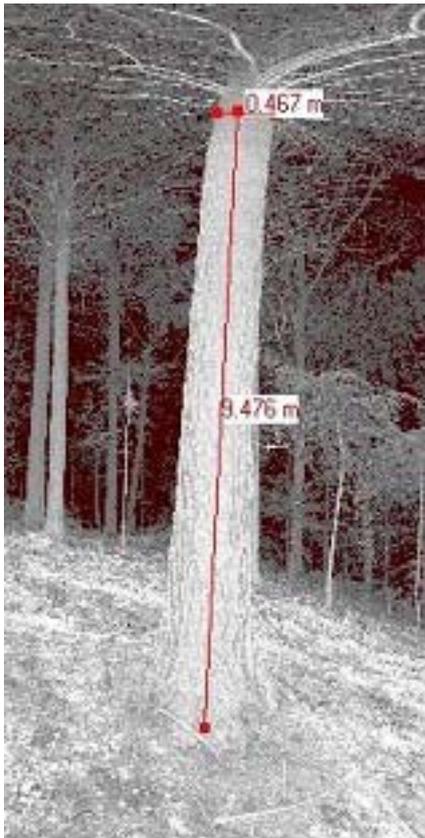


Abbildung 15: Bestimmung von nutzungsrelevanten Informationen aus Laserscanning

Wie oben erwähnt ist diese Methode nur bei Auswertungen mit vielen Standpunkten effektiv umzusetzen, da sich die Bestimmung einer bestimmten Information, wie z.B. des Durchmessers in einer bestimmten Höhe oder die Bestimmung der Kronenansatzhöhe anhand der Laserscanningdaten visuell mit Hilfe einfacher Laserscanningsoftware zeitlich sehr viel effizienter ermitteln lässt.

#### 2.1.1.4 Fazit/ Ausblick

Bei der Kombination von Inventurdaten lassen sich besonders im Hinblick auf die verwendeten Algorithmen noch Verbesserungen erzielen.

Zum einen lässt sich feststellen, dass die Baumerkennungs-Algorithmen sehr stark von der Vegetation, insbesondere von der Überdeckung von Ästen und Sträuchern, des Aufnahmebereiches beeinflusst werden.

So ist bei einem lichten Buchenbestand eine Baumidentifikation (siehe Plot 18, und 19) von 90% im Sichtbereich zu erzielen. Bei einem dichten Fichtenbestand (siehe Plot 8 und 9) hingegen ist eine eindeutige Baumidentifikation kaum möglich.

Zum anderen ist für große Bestände die automatisierte Auswertung zwar rechenintensiv, dennoch kann auf manuelles Eingreifen während der Auswertung verzichtet werden. Dieses lässt eine Stapelverarbeitung (zeitgesteuerter Batchlauf) zu.

Im Hinblick auf die Genauigkeit wurde festgestellt, dass der Laserscanner die Werte systematisch unterschätzt. Durch eine genauere Parametrisierung des Fehlereinflusses (Rindenstruktur, Visurwinkel) lässt sich die Genauigkeit der automatisierten Auswertung noch erhöhen.

In Rahmen dieses Projektes wurde mit dem Laserscanner IMAGER 5006 der Firma Zoller und Fröhlich gearbeitet, bei Verarbeitung dieser Laserdaten laufen die Algorithmen stabil. Versuchsweise wurde der Programmablauf auch mit älteren Scannerdaten getestet, hier ist die Laufsicherheit nicht immer als ausreichend einzustufen. Durch die Implementierung

dieser Scannerparameter (Headerverarbeitung) lässt sich die Laufsicherheit auch für diese Laserscanningdaten erhöhen.

Durch eine weitere Verbesserung der eingesetzten Algorithmen ist ein praxisorientierter Einsatz der Programmstruktur realisierbar.

## **2.1.2 Arbeitspaket 7: Auswertung von terrestrischen Laserscanningdaten auf Stichprobenbasis**

### **2.1.2.1 Ziele**

In diesem Arbeitspaket sollen die qualitativen Merkmale durch eine gemeinsame Auswertung der Intensitäts- und der Geometriedaten der Laserscanningdaten ermittelt werden, diese dienen zur Bewertung von Rohholz. Die Algorithmen sind mit Hilfe der Software MatLab und Halcon zu entwickeln. Dabei ist der folgende Ablauf vorgesehen: Zunächst die Separierung der zu untersuchenden Baumschäfte aus den Laserscanningdaten. Die entsprechenden Intensitäts- und Entfernungsbilder werden in zweidimensionale 16bit Informationen transformiert. Ziel ist es nun, aus diesen Bildern mit Hilfe von Bildverarbeitungsverfahren verschiedene Fehler zu ermitteln. In einem zweiphasigen Ablauf soll auf die verschiedenen Fehler, wie z.B. Astnarben, Beulen, Chinesenbärte oder Mondgrade bei glattrindigen und grobborkigen Baumarten eingegangen werden. Diese entwickelten Algorithmen sollen im Anschluss auch bei Nadelstarkholz angewendet werden. Die Programme sollen in die .NET-Plattform übernommen werden können und sollen somit über eine geeignete Schnittstelle verfügen.

### **2.1.2.2 Ergebnisse**

#### **Gliederung**

Bei der Auswertung von terrestrischen Laserscanningdaten auf Stichprobenbasis sind die folgenden Punkte insbesondere zu klären:

- Bestimmung des relevanten Baumes
- Bestimmung von Geometrieigenschaften
- Bewertung der Intensitätsinformationen
- Bestimmung von Holzfehlern

#### **Bestimmung des relevanten Baumes**

Um eine sinnvolle Baumauswahl treffen zu können, muss als erstes ein Stichprobenkreis erstellt und analysiert werden. Hierzu ist ein möglichst automatisierter Ansatz zu verfolgen, der in der Lage ist, die Laserscanningdaten möglichst praxisorientiert zu reduzieren, so dass der manuelle zeitliche Aufwand gering ist.

Mit Hilfe der im Programm Layer2trees (siehe Arbeitspaket 6) entwickelten Algorithmen und eines weiteren in Matlab entwickelten Programm lässt sich aus den Laserscanningdaten (siehe Abbildung 16) ein Stichprobenkreis erstellen. Anhand dieses Stichprobenbasiskreises werden nun die vorhandenen Bestände koordiniert und mit den entsprechenden Baumdurchmessern (Kreis), der Grundflächenzahl und dem Durchmesser des Grundflächenmittelstandes visualisiert.



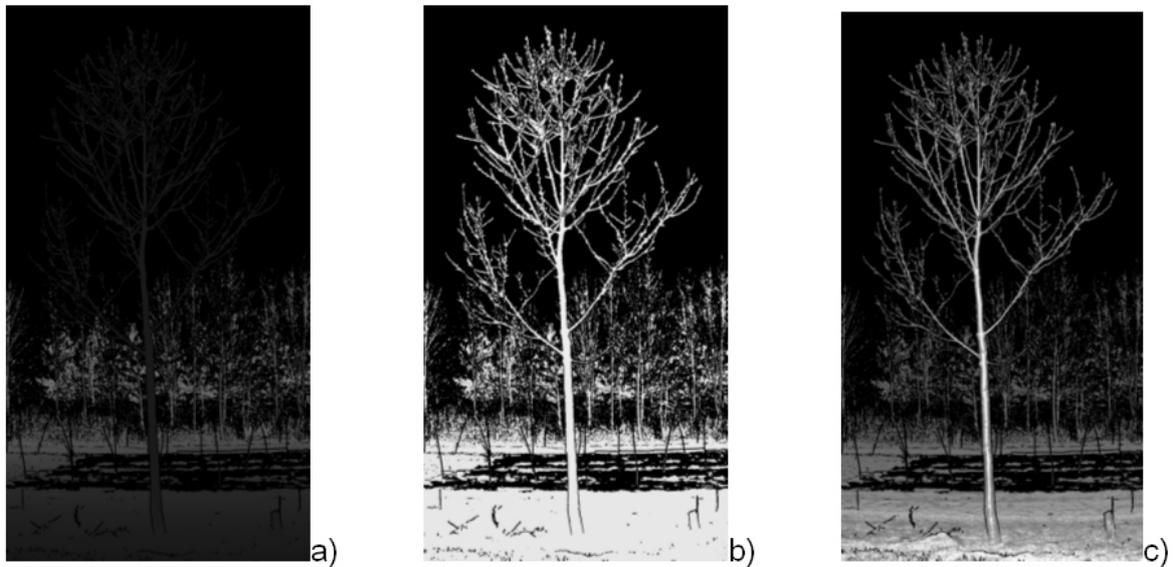


Abbildung 17: a) Intensitätsbild, b) Entfernungsbild, c) Grauwertbild

Mit Hilfe dieser 16bit Bilder wurden die einzelnen Bäume analysiert und Algorithmen entwickelt, die zur Wuchsform der Äste und zur Bestimmung der Kronenansatzhöhe dienen. Um die Geometrie zu erfassen, wurden die folgenden Algorithmen entwickelt:

#### 1. Bestimmung des Interessengebietes

Anhand des Intensitätsbildes und des Z-Bildes lässt sich das Interessengebiet festlegen.

#### 2. Skeletonisierung

Mit Hilfe der Halcon-Funktion Regiongrowing lässt sich nun der Teil des Interessengebietes herausfiltern, der zu dem zu bestimmenden Baum gehört.

#### 3. Segmentierung

Nun lassen sich die einzelnen Äste segmentieren und mit der Mittelgeraden des Astes visualisieren und koordinieren.

#### 4. Durchmesserbestimmung

Auf die Mittelgeraden der bestimmten Äste werden nun Orthogonalen gerechnet, die Länge der Orthogonalen wird hierbei durch die bekannte Region festgelegt.

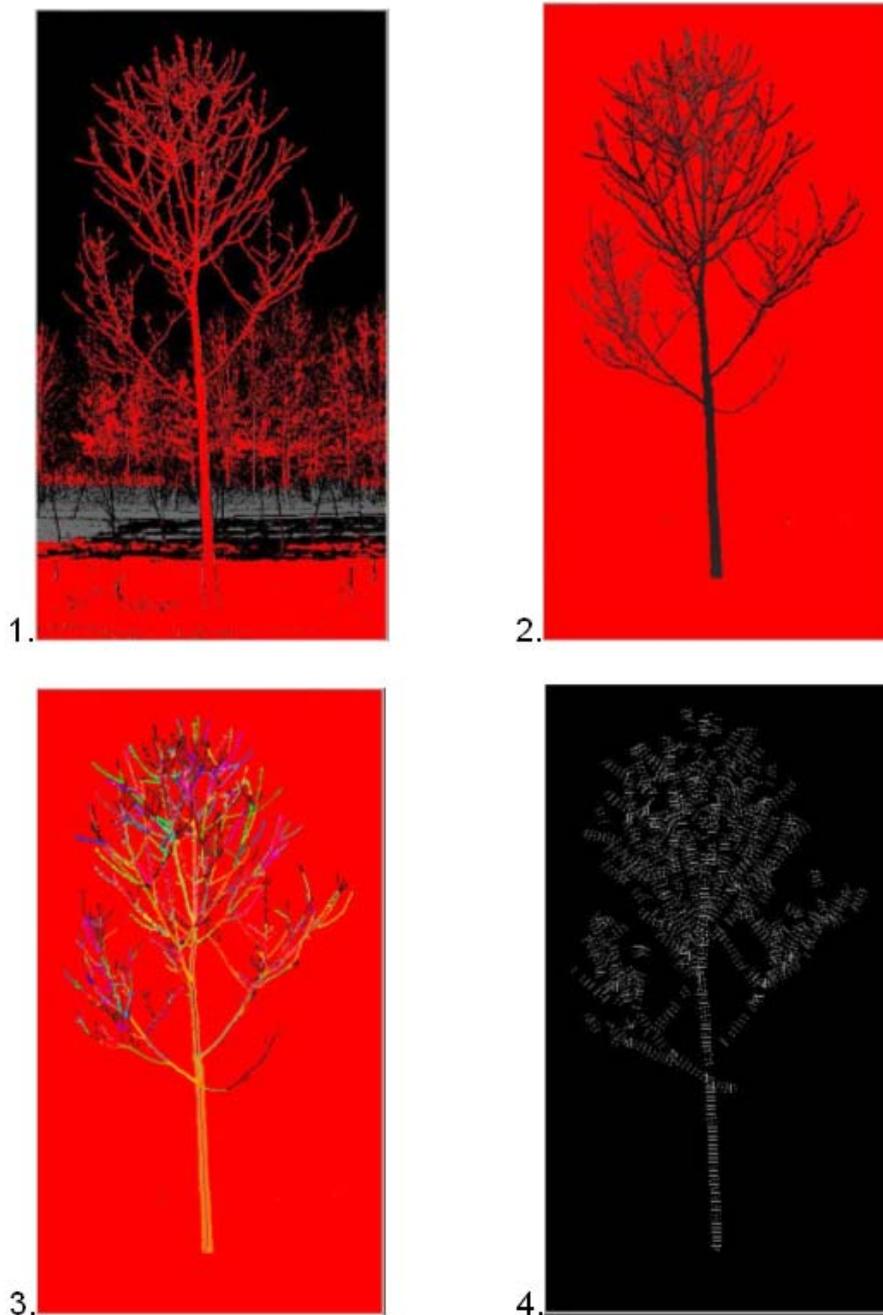


Abbildung 18: 1. Bestimmung des Interessengebietes, 2. Skeletonisierung, 3. Segmentierung, 4. Durchmesserbestimmung

Mit Hilfe dieser entwickelten Algorithmen lassen sich nun die einzelnen Durchmesser der Äste an verschiedenen Positionen, die koordinierten Äste, sowie die jeweiligen Wuchsformen der erfassten Äste und des Stammes bestimmen.

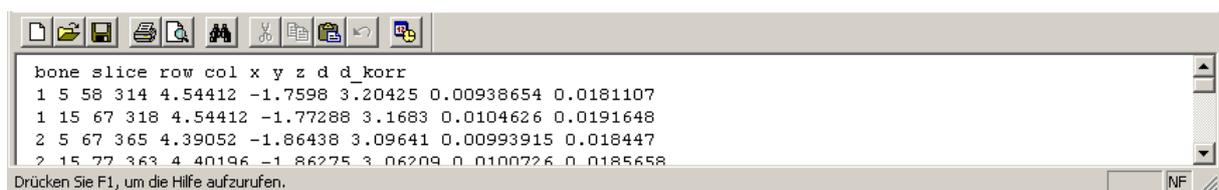


Abbildung 19: Auszug aus der Ergebnisdatei

## Bestimmung von Holzfehlern

Um alle Holzfehler eines Baumes zu erkennen, ist es notwendig, dass alle Seiten des Baumes erfasst werden, da sonst eine sichere Aussage zur Qualität des Holzes nicht möglich ist. Bei dem Verfahren zur Holzfehlerbestimmung wurden somit vier Laserscanningaufnahmen pro Baum gemacht.

Die über Bildverarbeitungsalgorithmen bestimmten Baumstämme wurden über die Form eines Zylinders abgewickelt. Dieser Zylinder wurde für jeden einzelnen Baum individuell erstellt und stellt somit den idealisierten Baumstamm dar. Der Zylinder wurde anhand von zwei Kreisen festgelegt, die am oberen und unteren Teil des Stammes bestimmt wurden. Anhand des gemittelten Mittelpunktes dieser beiden Kreise wurde nun der Zylinder angepasst.

Datenverlauf:

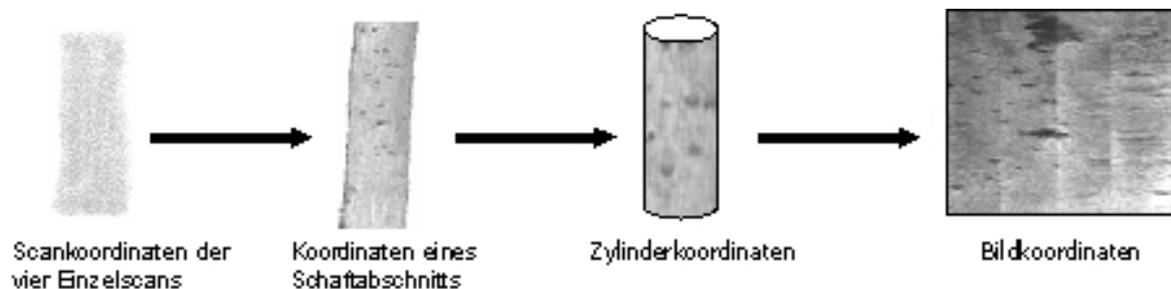
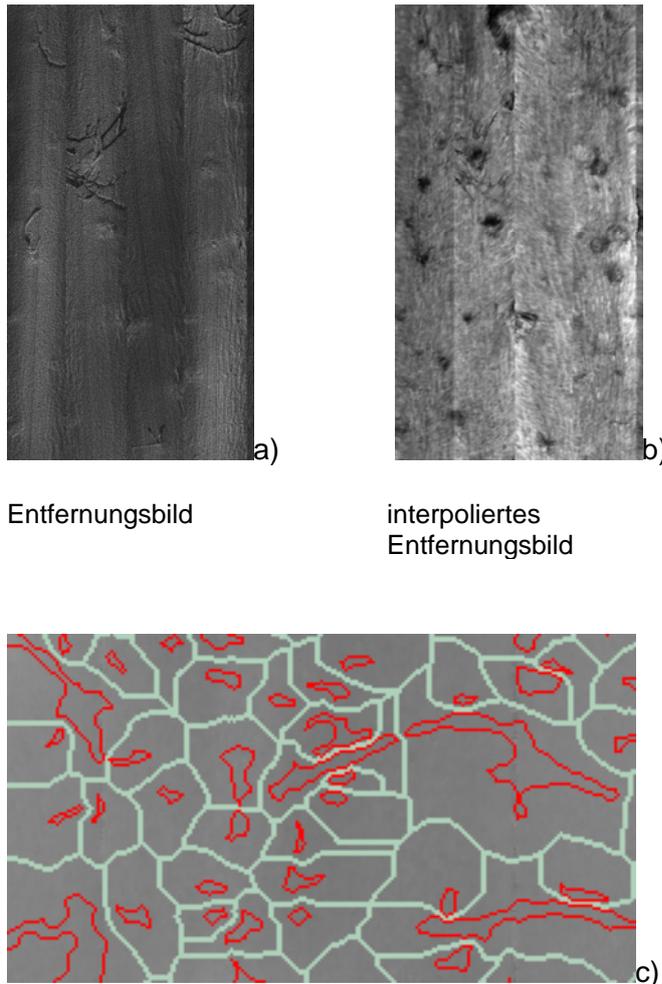


Abbildung 20: Datenverlauf

Als erstes wurden die Laserscanningdaten in Stammabschnittskordinaten transformiert. Das Stammabschnittskordinatensystem erstellt sich aus den vier Laserscanningdatensätzen und bezieht sich auf den abzuwickelnden Stamm. Auf dieser Grundlage wurden die Koordinaten aus dem kartesischen Stammkoordinatensystem in das jeweilige zylindrische Koordinatensystem umgerechnet.

Dadurch, dass der Stamm von mehreren Standpunkten aus aufgenommen wurde, ergibt sich ein Überlappungsbereich der Punktwolken, in diesem Überlappungsbereich ist die Qualität durch schleifende Schnitte tendenziell eher geringer einzuschätzen. Um eine möglichst hohe qualitative Genauigkeit zu erreichen, wird der Stamm in vier Streifen eingeteilt. Die Streifen ergeben sich aus den Winkelhalbierenden zweier benachbarter Standpunkte. Für die Ermittlung werden sowohl die Scannerstandpunkte als auch die Position des Referenzzyinders verwendet. Bei der Berechnung der Zylinderkoordinaten werden nur die Koordinatenpaare verwendet, deren Richtungswinkel zwischen den Winkelhalbierenden liegen. Nun können die Zylinderkoordinaten in Bildkoordinaten umgerechnet und gespeichert werden.



Entfernungsbild

interpoliertes  
Entfernungsbild

Da die Holzfehleranalyse auf mehreren Laserscannerstandpunkten beruht, ergeben sich Fehlstellen in der Abbildung auf dem Referenzzylinder. Diese Fehlstellen werden mit Hilfe der benachbarten Pixel interpoliert. Diese interpolierten Ergebnisse dienen nun als Inputdaten für das Programm WoodFlawFinder.

Mit dieser Software ist es möglich, eine teilautomatisierte Auswertung zur Holzfehlerdetektion und der entsprechenden Klassifizierung vorzunehmen. Die Software nimmt eine automatisierte Segmentierung der Bilder anhand der Grauwerte in Regionen vor. Jede dieser Regionen ist eine potentielle Fehlerregion (rot), die dazugehörige Umgebung wird grün dargestellt. Es werden für die Regionen die Merkmale bestimmt, die im Programm verwendeten neuronalen Netze verwenden diese Merkmale als Eingangsdaten. Durch das manuelle Zuordnen von Fehlern zu bestimmten Regionen kann das neuronale Netz trainiert werden. Diese so erstellten Datensätze können nun zur

Abbildung 21: a) Entfernungsbild, b) interpoliertes Entfernungsbild, c) Segmentierung

Auswertung von anderen Abwicklungsbildern verwendet werden. Die gespeicherten Endergebnisse der jeweiligen Auswertung enthalten den bestimmten Holzfehlertyp sowie dessen Ausdehnung und Lage im Bild.

### 2.1.2.3 Fazit/ Ausblick

Bei der Bewertung von Rohholz anhand von Laserscanningdaten kann man sagen, dass die automatisierte Erfassung von Durchmesser, Längen, Kronenansatzhöhen und das daraus resultierende Volumen, insbesondere bei Stammdaten aus einem Einzelscan mit Hilfe der 16bit-Bildverarbeitung, gewonnen werden können.

Bei der Bestimmung von einzelnen Holzfehlern an einem Bestand ist derzeit noch die Verwendung von Multiscans bezogen auf einen Einzelbaum zwingend erforderlich. Hierbei ist auch dann noch ein umfangreiches Trainieren der neuronalen Netze mit verschiedensten Laserscanningdaten von glattrindigen und grobborkigen Bäumen nötig. Um einen praxisorientierten Einsatz der Holzfehlererkennungsalgorithmen möglich zu machen, müssen zum einen die neuronalen Netze weiter trainiert werden, und zum anderen die daraus resultierenden Ergebnisse auf Einzelscans anwendbar sein, da ansonsten kein zeiteffektives Vorgehen möglich ist. Die .NET-Schnittstellen sind soweit stabil, dass Daten nach der

Headeridentifikation der Laserscanningdaten in der Regel alle Programmablaufkomponenten durchlaufen.

## 2.1.3 Arbeitspaket 8: Einschätzung der Nutzholzausbeute

### 2.1.3.1 Ziele

Zusammen mit den ermittelten Qualitätsmerkmalen sind für die Einschätzung der Nutzholzausbeute geometrische Qualitätsparameter notwendig. Dazu zählen Abholzigkeit, Krümmung, Neigung und Ovalität der Bäume. Sie sind aus den rekonstruierten Geometrien der Bäume ableitbar. Ergebnis des Arbeitspakets ist eine Verwendungsempfehlung für die Rohholzverwertung. Die Implementierung der Algorithmen soll in die .NET-Umgebung stattfinden. Mit Hilfe der Informationen sollen Aussagen zur Nutzholzausbeute für die Stichproben getroffen werden.

### 2.1.3.2 Ergebnisse

Mit Hilfe der entwickelten Algorithmen und der daraus resultierenden Software mit .NET-Schnittstelle lassen sich die verschiedenen Qualitätsparameter zur Nutzholzausbeute ermitteln. Das Ergebnis stellt sich als Gesamtbestands- oder Einzelbaumanalyse dar; hier exemplarisch für einen Einzelbaum dargestellt:

Tabelle 7: Ergebnisse der Gesamtbestands- und Einzelbaumanalyse

Mode	LayerHeight	Row	Column	Diameter	Rechts	Hoch	EIIRow	EIIColumn	EIIPhi	EIIRadius1	EIIRadius2
M	0.5	730.026	1145.288	79.234	-1.432	5.575	730.607	1145.441	0.262	39.508	38.952
M	0.6	731.925	1145.966	74.592	-1.425	5.556	721.807	1142.626	1.906	48.571	39.489
M	0.7	732.727	1146.525	72.097	-1.420	5.548	722.232	1144.237	1.776	47.430	38.242
M	1	734.054	1147.555	66.082	-1.409	5.534	735.613	1147.457	3.055	33.088	31.249
M	1.2	732.226	1147.712	64.892	-1.408	5.553	728.851	1146.257	1.997	36.483	32.965
M	1.3	732.823	1147.985	62.548	-1.405	5.547	722.033	1145.017	1.865	43.050	33.279
M	1.4	732.024	1147.853	61.697	-1.406	5.555	724.964	1145.763	1.886	38.758	32.074
M	1.5	731.835	1148.375	60.815	-1.401	5.557	725.476	1145.971	1.945	37.763	31.480
M	2	729.289	1147.459	60.063	-1.410	5.582	726.712	1146.047	2.106	33.126	30.714
M	2.5	728.511	1146.198	58.628	-1.423	5.590	725.834	1144.158	2.242	33.075	29.622
M	3	728.556	1145.760	57.484	-1.427	5.589	726.240	1144.621	2.062	31.452	29.345
M	3.5	727.022	1145.293	58.134	-1.432	5.605	727.628	1146.064	0.805	29.185	27.901
M	4	727.966	1145.560	55.939	-1.429	5.595	729.988	1145.630	0.003	27.670	25.721
M	4.5	727.743	1144.632	55.796	-1.439	5.598	728.107	1143.655	2.664	28.864	26.838
M	5	727.691	1144.658	54.744	-1.438	5.598	730.928	1145.365	0.212	26.530	23.862
M	8.5	722.784	1147.208	57.701	-1.413	5.647	734.192	1149.862	0.231	24.986	16.710
M	9	723.772	1146.939	55.168	-1.416	5.637	735.499	1147.858	0.070	23.992	15.196
I	1.3	0.000	0.000	62.982	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
I	7	0.000	0.000	55.998	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000

**Mode:** Gibt an wie die Daten der Zeile erstellt wurden (M= gemessen; I= interpoliert)  
**LayerHeight:** Die Höhe des Layers über dem Grundpunkt des Baumes  
**Row:** Bildzeile des angepassten Kreismittelpunkts im .ras-Image  
**Column:** Bildspalte des angepassten Kreismittelpunkts im .ras-Image  
**Diameter:** Durchmesser des angepassten Kreises in cm  
**Rechts:** Gibt den Rechtswert im übergeordneten Koordinatensystem an (X-Koordinate)  
**Hoch:** Gibt den Hochwert im übergeordneten Koordinatensystem an (Y-Koordinate)  
**EllRow:** Bildzeile des Ellipsenmittelpunkts  
**EllColumn:** Bildspalte des Ellipsenmittelpunkts  
**EllPhi:** Gibt die Ausrichtung der beiden Halbachsen an der Kontur des Baumes an  
**EllRadius1:** Gibt den ersten Radius der Ellipse an  
**EllRadius2:** Gibt den zweiten Radius der Ellipse an

Anhand dieser Daten lassen sich Informationen zur Abholzigkeit, Krümmung, Neigung und Ovalität ermitteln und visuell darstellen. Des Weiteren werden die wichtigen Parameter BHD und Durchmesser in 7m Höhe interpoliert. Wie zu erkennen ist, passen diese Daten in der Regel sehr gut zu den tatsächlich ermittelten, die Differenz beträgt in diesem Beispiel weniger als einen halben Zentimeter.

Die Abholzigkeit lässt sich anhand der Durchmesser in den verschiedenen Höhen visualisieren. Mit Hilfe der Durchmesser in den verschiedenen Höhen lässt sich sehr gut die Abholzigkeit des Baumes bestimmen.

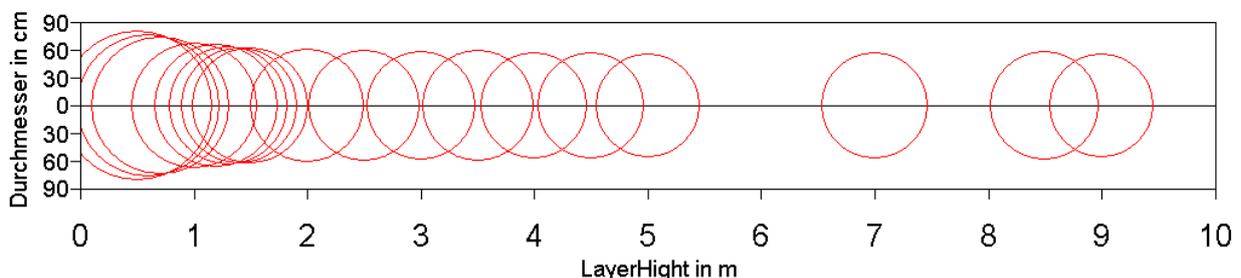


Abbildung 22: Abholzigkeitsbestimmung durch Vergleich des Durchmessers in unterschiedlichen Höhen

Die Krümmung wird anhand der Mittelpunktskoordinaten in den verschiedenen Höhen (LayerHeight) bestimmt.

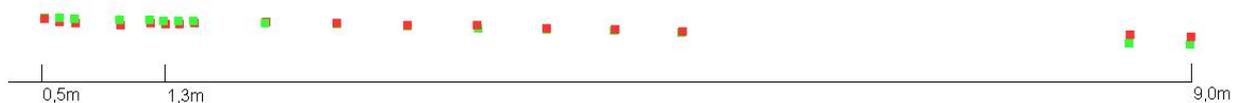


Abbildung 23: Krümmung anhand der Mittelpunktskoordinaten in verschiedenen Höhen

Die Neigung wird anhand der gemittelten Mittelpunktskoordinaten und der Mittelpunktskoordinaten in der Höhe 1,30 m und 9,00 m festgelegt. Die Darstellung visualisiert die Krümmung unmaßstäblich, der Abweichwinkel vom Baumschaft zum Idealwuchs beträgt 1Grad.

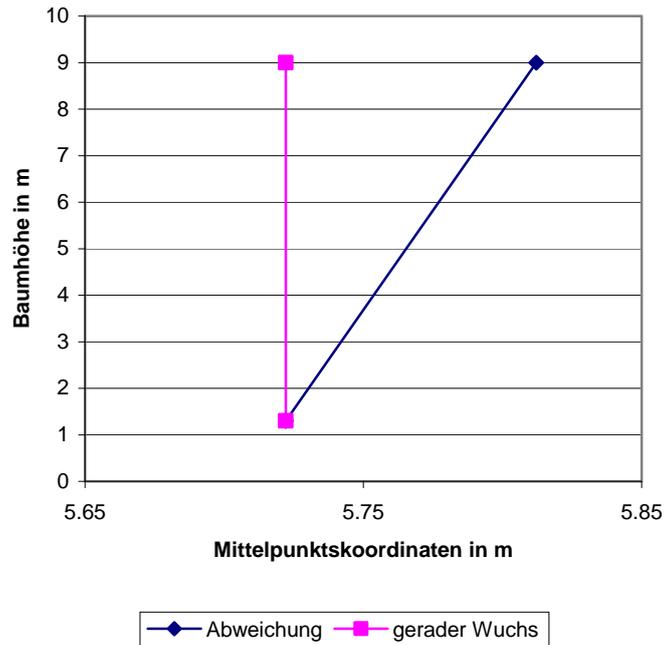


Abbildung 24: Abhängigkeit zwischen Mittelpunktskoordinate und Baumhöhe

Die Ovalität wird anhand der Ellipsenradien gemessen, als Vergleich wird hier der idealisierte Rundstamm dargestellt.

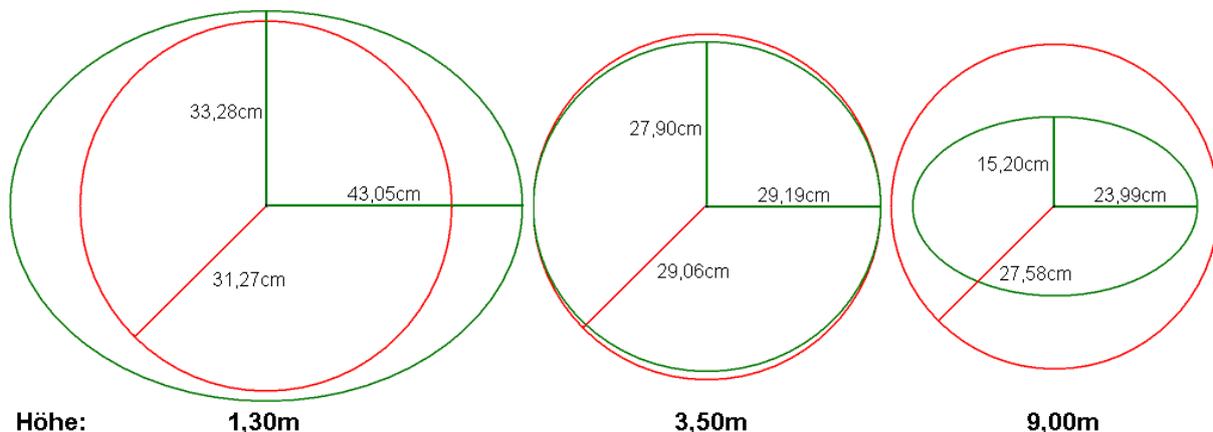


Abbildung 25: Ermittlung der Ovalität anhand von Ellipsenradien

### 2.1.3.3 Fazit/Ausblick

Im Hinblick auf die Nutzholzausbeute und die daraus erfolgende Verwendungsempfehlung kann man feststellen, dass in der Regel alle relevanten Qualitätsparameter mit dem Laserscanner gut erfasst werden können, vorausgesetzt der Bestand ist nicht zu dicht. Auf Grundlage dieser Daten lassen sich nun die neu entwickelten Algorithmen anwenden; diese bilden eine gute Grundlage um eine Qualitätsschätzung vorzunehmen. Bei dem automatisierten Verfahren treten noch Fehlmessungen auf bzw. es werden je nach Dichte des Bestandes nur ein Teil der Bäume erkannt. Des Weiteren ist bei der

Qualitätseinschätzung darauf zu achten, dass sich die ermittelten Daten nur auf den Sichtbereich des Laserscanners beziehen.

## **2.1.4 Arbeitspaket 9: Dynamisierung**

### **2.1.4.1 Ziele**

In diesem Arbeitspaket soll die Entwicklung der einzelnen über terrestrisches Laserscanning sowie über herkömmliche Inventurmethode erfassten Daten prognostiziert werden. Dabei ist auf die für die künftige Nutzung entscheidenden Parameter einzugehen. Dies bedeutet, dass Dickenwachstum, Astreinigung und Mortalität einschließlich der natürlichen Differenzierung für den Zeitraum bis zur nächsten Erfassung voraussagen sind. Dabei ist davon auszugehen, dass etwa alle zehn Jahre eine neue Inventur durchgeführt wird.

### **2.1.4.2 Ergebnisse**

Um die Parameter einer Dynamisierung bestimmen zu können, war es notwendig, eine bereits aufgenommene Fläche erneut zu erfassen. Hierbei wurde eine Fläche gewählt, die zum einen einen möglichst ähnlichen Waldbestand darstellt. Dies trifft auf die Flächen in Waldkirch zu. Zum anderen wurde eine Fläche gewählt, zu deren Erstaufnahme ein gewisser zeitlicher Abstand besteht. Es wurde sich für diese Aufnahme für eine Fläche im Freiburger Bergwald bei Günterstal entschieden. Diese Flächen wurden bereits im Jahr 2002 gescannt und sind durch ihre Bestandsstruktur gut mit den Flächen in Waldkirch vergleichbar.

Dadurch, dass die Standpunkte im Jahr 2002 sicher vermarktet wurden, war eine Wiederholungsaufnahme mit gleicher Scannerausrichtung möglich.

Die Wiederholungsaufnahme wurde mit dem Laserscanner IMAGER 5006 durchgeführt, die Erstaufnahme hingegen wurde noch mit dem älteren IMAGER Modell 5003 abgewickelt. Da die Scannertaktung des Modells 5003 zum Modell 5006 von 8.400 auf 10.000 erhöht wurde ist eine Abgleichung der Daten nötig. Nach dieser Abgleichung kann man die Daten miteinander gut vergleichen.



*Abbildung 26: Vergleich der Scannerdaten aus 2002 (rot) und Scannerdaten aus 2007 (grün)*

Die grüne Darstellung zeigt die Scannerdaten von 2002, die roten Daten sind die Scannerdaten 2007. Wie man im linken Bereich des Bildes sehr gut sehen kann, ist hier ein Baum der 2002 noch vorhanden war, entfernt worden.

Anhand der beiden Scanneraufnahmen von 2002 und 2007 wurde auf Grundlage des im Arbeitspaket 6 entwickelten Ablaufplans eine Erweiterung dieses Ablaufplans vorgenommen.

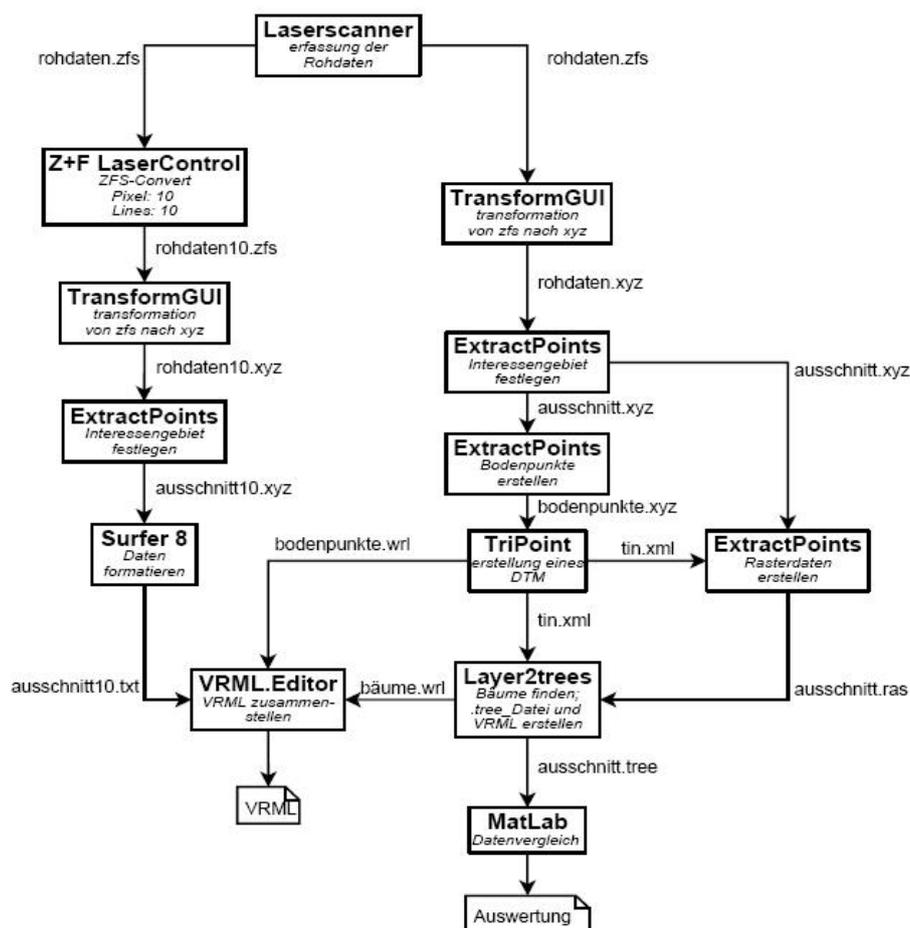


Abbildung 27: Programmablauf

Mit Hilfe dieser Weiterentwicklung des Programmablaufes ist es nun möglich, anhand der Daten zum einen die ermittelten Durchmesser in den verschiedenen Höhen darzustellen und des Weiteren einen visuellen Vergleich der Daten von 2002 und 2007 mit Hilfe eines VRML-Modells zu realisieren.



Abbildung 28: VRML und Erstellung der Durchmesserscheiben in verschiedenen Höhen

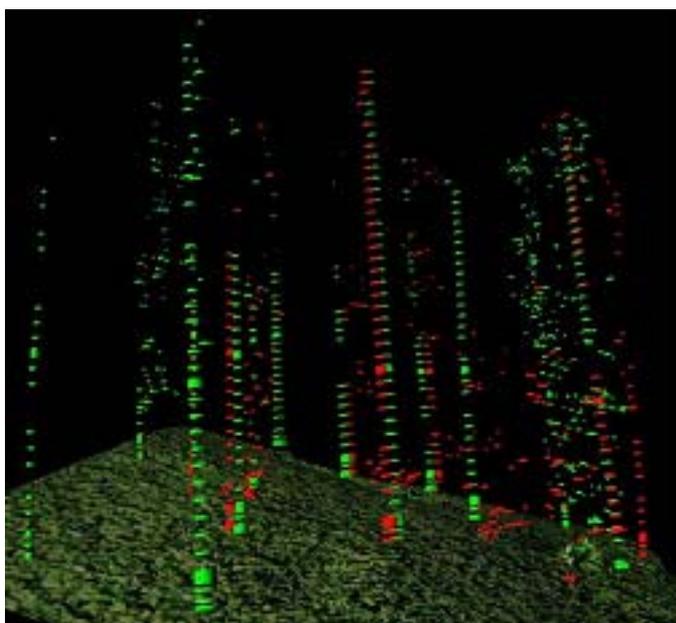


Abbildung 29: Vergleich der Durchmesserscheiben aus den Jahren 2002 (grün) und 2007 (rot)

Das erste VRML-Modell soll veranschaulichen, wie aus den Rohdaten (weiße Punktwolke) des Laserscanners die Durchmesserscheiben in den verschiedenen Höhen (farbig dargestellt) erstellt wurden.

Das zweite VRML-Modell zeigt den direkten Vergleich zwischen den Durchmesserscheiben aus dem Jahr 2002 und dem Jahr 2007, die grünen Datenbestände sind die aus dem Jahr 2002, die roten Datenbestände sind die Daten aus dem Jahr 2007. Hier kann man zum Beispiel sehr gut sehen, wie im vorderen Bereich des VRML-Modells ein Stamm im Bestand von 2002 noch vorhanden ist und im Bestand von 2007 gänzlich fehlt. Für beide VRML-Modelle war es notwendig, als erstes ein dreidimensionales Geländeprofil zu erstellen, um die Mittelpunktskordinaten der einzelnen Baumschäfte richtig zu orientieren.

Durch die eindeutige Bestimmung der verschiedenen Bäume lässt sich nun eine genauere Einzelbaumbetrachtung durchführen. Hierbei ist der Fokus besonders auf die Durchmesser und deren Zuwachs gelegt worden. Wie in der unteren Abbildung zu sehen ist, konnte aus den bestimmten Daten zwischen fünf Bäumen ein klarer Zusammenhang anhand der Mittelpunktskordinaten hergestellt werden.

Das erste VRML-Modell soll veranschaulichen, wie aus den Rohdaten (weiße Punktwolke) des Laserscanners die Durchmesserscheiben in den verschiedenen Höhen (farbig dargestellt) erstellt wurden. Das zweite VRML-Modell zeigt den direkten Vergleich zwischen den Durchmesserscheiben aus dem Jahr 2002 und dem Jahr 2007, die grünen Datenbestände sind die aus dem Jahr 2002, die roten Datenbestände sind die Daten aus dem Jahr 2007. Hier kann man zum Beispiel sehr gut sehen, wie im vorderen Bereich des VRML-Modells ein Stamm im Bestand von 2002 noch vorhanden ist und im Bestand von 2007 gänzlich fehlt. Für beide VRML-Modelle war es notwendig, als erstes ein dreidimensionales Geländeprofil zu erstellen, um die Mittelpunktskordinaten der einzelnen Baumschäfte richtig zu orientieren. Durch die eindeutige Bestimmung der verschiedenen Bäume lässt sich nun eine genauere Einzelbaumbetrachtung durchführen. Hierbei ist der Fokus besonders auf die Durchmesser und deren Zuwachs gelegt worden. Wie in der unteren Abbildung zu sehen ist, konnte aus den bestimmten Daten zwischen fünf Bäumen ein klarer Zusammenhang anhand der Mittelpunktskordinaten hergestellt werden.

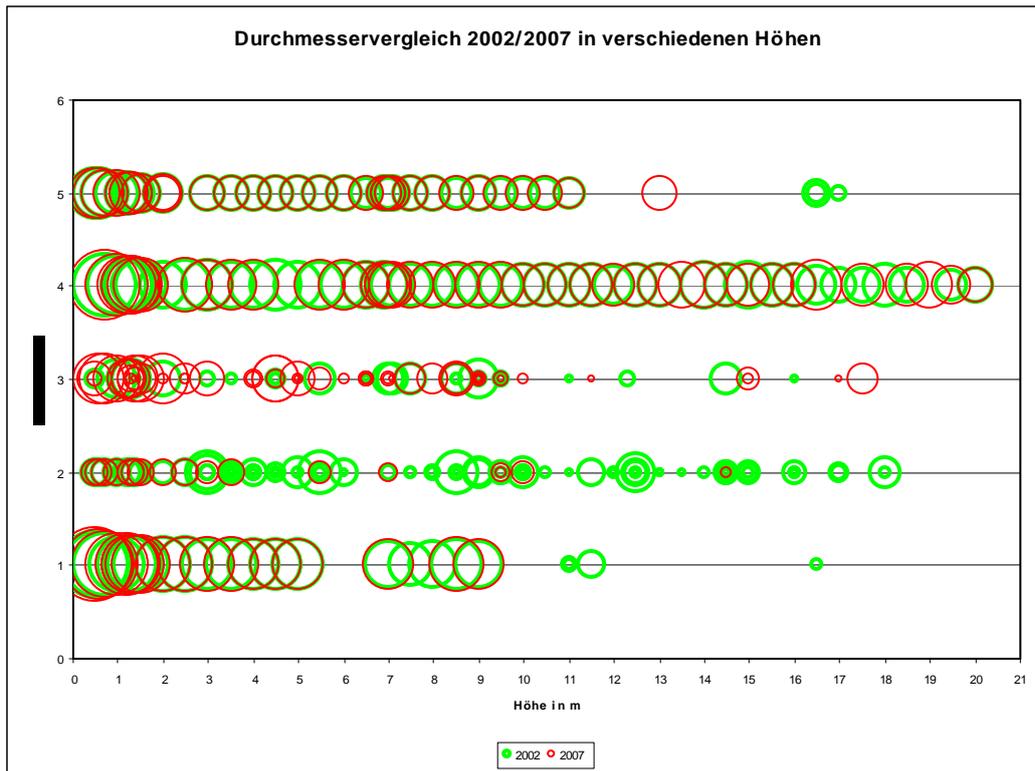


Abbildung 30: Durchmesservergleich 2002/2007 in verschiedenen Höhen

Durch eine Plausibilitätsprüfung der Einzelbäume konnten die Fehldurchmessermessungen eliminiert werden. Im nächsten Schritt konnten nun die Bäume miteinander verglichen werden.

### **2.1.4.3 Fazit/ Ausblick**

Im Hinblick auf die Einschätzung des Dickenwachstums der Baumstämme lassen sich mit dem verfolgten Ansatz erste Ergebnisse erzielen, die eine Einschätzung der zeitlichen Entwicklung des Bestandes zulassen. In diesem Zuge ist eine Weiterentwicklung der Algorithmen erstrebenswert, da zurzeit leider ein Teil des Bestandes nur unzureichend oder gar nicht erfasst und bestimmt wird. Da zurzeit leider nur maximal fünf Jahre alte Laserscannerdaten zur Verfügung stehen, wäre auch ein Ansatz interessant, der den Unterschied zwischen größeren Zeitspannen, wie etwa zehn Jahre, darstellt. Im Zuge dieser Weiterentwicklung wäre dann auch eine plausible und praxistaugliche Bestimmung der Dynamisierung zu realisieren.

### **2.1.5 Zusammenfassung der Ergebnisse des IWW**

Bei der Kombination verschiedener Inventurverfahren lässt sich festhalten, dass die Stabilität der Baumerkennungs-Algorithmen stark von der jeweiligen Vegetation und insbesondere von den Überdeckungen von Ästen und Sträuchern abhängig ist. Bei großen Beständen ist die automatisierte Auswertung zwar rechenintensiv, dennoch ist dieses Vorgehen praxistauglich, da hier eine Stapelverarbeitung möglich ist. Bei der Kombination verschiedener Inventurverfahren ist besonders darauf zu achten, dass der Laserscanner die Durchmesserdaten systematisch unterschätzt.

Bei der Auswertung von terrestrischen Laserscanningdaten auf Stichprobenbasis zur Bewertung von Rohholz kann man abschließend festhalten, dass mit Hilfe der automatisierten 16bit-Bildverarbeitungs-Erfassung die Durchmesser, Längen und Kronenansatzhöhen gewonnen werden können. Bei der Bestimmung von einzelnen Holzfehlern reicht ein Einzelscan derzeit noch nicht aus.

Im Hinblick auf die Nutzholzausbeute und die daraus erfolgende Verwendungsempfehlung kann man feststellen, dass in der Regel alle relevanten Qualitätsparameter mit dem Laserscanner gut erfasst werden können, vorausgesetzt, der Bestand ist nicht zu dicht. Auf Grundlage dieser Daten lassen sich nun die neu entwickelten Algorithmen anwenden; diese bilden so dann eine gute Grundlage, um eine Qualitätsschätzung vorzunehmen.

Im Hinblick auf die Einschätzung des Dickenwachstums der Baumstämme lassen sich mit dem verfolgten Ansatz erste Ergebnisse erzielen, die eine Einschätzung der zeitlichen Entwicklung bzw. der Dynamisierung des Bestandes zulassen.

### **2.1.6 Ausblick**

Bei der Kombination von Inventurdaten lassen sich besonders im Hinblick auf die verwendeten Algorithmen noch Verbesserungen erzielen. Im Hinblick auf die Genauigkeit wurde festgestellt, dass der Laserscanner die Werte systematisch unterschätzt. Durch eine genauere Parametrisierung des Fehlereinflusses (Rindenstruktur, Visurwinkel) lässt sich die Genauigkeit der automatisierten Auswertung noch erhöhen. Durch eine weitere Verbesserung der eingesetzten Algorithmen ist ein praxisorientierter Einsatz der Programmstruktur realisierbar.

Um bei der Auswertung von terrestrischen Laserscanningdaten auf Stichprobenbasis einen praxisorientierten Einsatz der Holzfehlererkennungsalgorithmen zu ermöglichen, müssen zum einen die neuronalen Netze weiter trainiert werden, und zum anderen die daraus resultierenden Ergebnisse auf Einzelscans anwendbar sein, da ansonsten kein zeiteffektives Vorgehen möglich ist.

Bei der Einschätzung der Nutzholzausbeute mit Hilfe des automatisierten Verfahrens treten zurzeit noch Fehlmessungen auf bzw. es werden je nach Dichte des Bestandes nur ein Teil der Bäume erkannt. Hier ist eine Weiterentwicklung der Algorithmen anzustreben.

Im Zuge der Dynamisierung ist eine Weiterentwicklung der Algorithmen erstrebenswert. Im Zuge dieser Weiterentwicklung wäre dann auch eine praxistaugliche Bestimmung der Dynamisierung zu realisieren.

## **2.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans**

Das entwickelte Verfahren steigert die Effizienz und Genauigkeit bei der Durchführung von Waldinventuren deutlich. Die Ergebnisse können daher in öffentlichen und privaten Forstverwaltungen, in Planungsbüros sowie in großen Forstkonzernen im In- und Ausland genutzt werden.

## **2.3 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen**

Am Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung der TU Dresden werden ebenfalls Algorithmen entwickelt um Einzelbäume mit Hilfe von terrestrischen Laserscans zu analysieren. Im Laufe der Projektlaufzeit wurden Entwicklungen vorgestellt, mit deren Hilfe es möglich ist, Bäume automatisch in der Punktwolke zu detektieren und den Durchmesser in verschiedenen Höhen zu bestimmen (Bienert et al. 2007b, Bienert und Scheller 2008). Diese Gruppe beschäftigte sich ebenfalls mit Methoden, die auf Single-Scan-Daten basieren (Bienert et al. 2007a). Auch am Finnish Geodetic Institute werden Algorithmen entwickelt, die Single-Scan-Daten als Ausgangspunkt nehmen, um die Baumposition und Informationen zum Stamm zu erhalten (Litkey et al. 2008, Liang et al. 2008). An der TU München wurde ein Ansatz entwickelt, der es, ähnlich dem hier vorgestellten, ausnutzt, dass die Laserscandaten zur Speicherung und zur Visualisierung in zweidimensionale Daten umgewandelt werden (Pal 2007, Pal 2008). Diese können deshalb zunächst ebenfalls mit Bildverarbeitungsalgorithmen bearbeitet werden, ohne dass der Bezug zum dreidimensionalen Raum verloren geht. Der Rechenaufwand um beispielsweise die Baumposition zu bestimmen kann so verringert werden. Die Gruppe bestimmt auf diesem Wege Informationen zur Struktur des Baumes und der Blätter sowie zu den Baumkronen.

Darüber hinaus gibt es einige Gruppen, die sich mit der Analyse der Kronen von Bäumen beschäftigen und während der Projektlaufzeit neue Entwicklungen veröffentlichten (Fleck et al. 2007, Danson et al. 2008, Moorthy et al. 2008),

Um quantitative und qualitative Aussagen zu Einzelbäumen aus terrestrischen Laserscandaten ableiten zu können, ist manuelle Unterstützung im Moment noch oft unumgänglich. Darüber hinaus fehlen oft grundsätzliche Daten zu Genauigkeitsaussagen oder Untersuchungen zu Problembereichen. Am Biosystems Department der Katholieke Universiteit Leuven wurde deshalb untersucht, wie Abschattungen die Qualität der Daten beeinflussen (Van der Zande et al. 2008a und 2008b).

## **2.4 Erfolge und geplante Veröffentlichungen**

Noch nicht erfolgte Veröffentlichung im International Journal of Remote Sensing:

C. Morhart, U. Kretschmer, F. Wandhofer, H. Spiecker: Accuracy of branch diameters obtained by terrestrial laser scan data

## **3 Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht**

### **3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms**

Das Teilvorhaben liefert einen Beitrag zu den förderpolitischen Zielen der vom BMBF formulierten Forschungsfelder über die „Erschließung von Wertschöpfungspotentialen entlang der Forst-Holz-Kette und Nachhaltige Bewirtschaftung, Nutzung und Entwicklung von Wäldern und walddreichen Landschaften“. Es umfasst die Erarbeitung von innovativen Techniken für die Bereitstellung von Waldinformationen. Dabei ist es das Ziel, diese Informationen für Stichproben hochpräzise zu erfassen. Durch die Nutzung von terrestrischem Laserscanning können auf effektive Weise wichtige Informationen über die Nutzungsausbeute und Qualität stichprobenartig aufgenommen werden. Damit wird eine rationelle und gleichzeitig sehr genaue Technik durch das Zusammenführen verschiedener Methoden entwickelt.

### **3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen**

- **Kombination verschiedener Inventurverfahren**

Entwicklung eines Verfahrens zur Kombination von Informationen und Merkmalen aus herkömmlichen Inventurverfahren mit Merkmalen aus terrestrischen Laserscanning-Methoden

- **Auswertung von terrestrischen Laserscanningdaten auf Stichprobenbasis**

Automatisierte Erfassung von Durchmesser, Länge, Kronenansatzhöhe und Volumen durch die Auswertung von Intensitäts- und Geometriedaten der terrestrischen Laserscanninginformationen. Dadurch kann eine Bewertung des Rohholzes gewährleistet werden.

- **Einschätzung der Nutzholzausbeute**

Erfassung relevanter Qualitätsmerkmale (Abholzigkeit, Krümmung, Neigung, Ovalität) durch terrestrisches Laserscanning

- **Dynamisierung**

Einschätzung / Prognose der zeitlichen Entwicklung des Bestandes hinsichtlich des Dickenwachstums der Baumstämme durch die kombinierte Auswertung von terrestrischem Laserscanning mit herkömmlichen Inventurmethode

### **3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Mittels terrestrischem Laserscanning und der Kombination mit herkömmlichen Inventurverfahren können für die Nutzholzausbeute wichtige Qualitätsmerkmale (Durchmesser, Länge, Kronenansatz) bereits im Wald an stehenden Bäumen ermittelt werden. Dieser neue Ansatz steigert die Präzision der üblichen terrestrischen Aufnahmen bei Waldinventuren erheblich.

### **3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

keine

### **3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)**

Die Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem Verbundprojekt MatchWood wurden im Rahmen einer Abschlusstagung im Dezember 2008 Entscheidungsträgern und Experten aus der Wissenschaft und Praxis der Forst- und Holzwirtschaft vorgestellt und hinsichtlich der

operativen Umsetzung diskutiert. Die Ergebnisse stehen auf der Projekthomepage [www.matchwood.uni-freiburg.de](http://www.matchwood.uni-freiburg.de) über das Projektende hinaus zur Verfügung.

### 3.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Die Ausgaben wurden entsprechend den zugewiesenen Mitteln eingehalten. Die Einzelzuweisungen sind den beim Projektträger vorliegenden Zwischenverwendungsnachweisen zu entnehmen. Hinsichtlich der Finanzplanung haben sich keine Änderungen ergeben. Das zur Verfügung stehende Budget wurde nicht überzogen und entspricht den Projektausgaben.

Das Projekt wurde in Abstimmung mit dem Projektträger um 4 Monate (von 31.08.2008 auf 31.12.2008) kostenneutral verlängert. Der Zeitplan konnte entsprechend den Vorgaben im Projektantrag eingehalten werden. Die Arbeitspakete verteilten sich regelmäßig über die Projektlaufzeit.

## 4 Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)  Schlussbericht	
3. Titel  Teilprojekt 1: Rationelle und präzise Bestandserfassung  im Verbundprojekt „MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung“		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]  Prof. Dr. Heinrich Spiecker  Frank Wandhofer	5. Abschlussdatum des Vorhabens  31.12.2008	
	6. Veröffentlichungsdatum	
	7. Form der Publikation  Schlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)  Institut für Waldwachstum	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Tennebacherstraße 4 79085 Freiburg	10. Förderkennzeichen 0330616A
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	11. Seitenzahl 38  13. Literaturangaben  für 14. Tabellen 8 15. Abbildungen 30
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 53170 Bonn	
18. Kurzfassung  <p>Das Institut für Waldwachstum hat im Rahmen dieses Projektes Daten, die mit Hilfe terrestrischer Laserscanning-Methoden ermittelt wurden, mit Parametern aus herkömmlichen Inventurmethode kombiniert. Dabei hat sich herausgestellt, dass die Stabilität der Baumerkennungs-Algorithmen stark von der jeweiligen Vegetation und von Überdeckungen durch Äste und Sträucher abhängt. Für die Praxistauglichkeit wurde empfohlen große Bestände, die sehr rechenintensiv sind, durch automatisierte Batch-Jobs auszuwerten. Außerdem sind bei der Kombination verschiedener Inventurverfahren die Eigenheiten der verschiedenen Messverfahren aufeinander abzustimmen.</p> <p>Die Auswertung von terrestrischen Laserscanningdaten auf Stichprobenbasis zur Bewertung von Rohholz mit der automatisierten 16bit-Bildverarbeitungs-Erfassung ergibt die Durchmesser, Längen und Kronenansatzhöhen der Bäume. Außerdem wurden Holzfehler bestimmt. Dabei stellte sich heraus, dass ein Einzelscan nicht zur Bestimmung von einzelnen Holzfehlern ausreicht.</p> <p>Die Nutzholzausbeute und die daraus erfolgende Verwendungsempfehlung mit den relevanten Qualitätsparametern wurde durch den Laserscanner gut erfasst, falls der Bestand nicht zu dicht ist. Die neu entwickelten Algorithmen bilden hier eine gute Grundlage zur Qualitätsschätzung.</p> <p>Erste Einschätzungen des Bestandeswachstums lassen sich über periodische Aufnahmen zur Bestimmung des Dickenwachstums der Baumstämme erzielen.</p>	

19. Schlagwörter	
Terrestrisches Laserscanning, Stichprobe, Waldwachstum, Durchmesserentwicklung, Holzqualität, Astigkeit, Kronensansatzhöhe,	
20. Verlag	21. Preis

## 5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in % je nach Entfernung.....	99
Abbildung 2: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in cm je nach Entfernung.....	100
Abbildung 3: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in % je nach Durchmesser.....	101
Abbildung 4: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in cm je nach Durchmesser.....	101
Abbildung 5: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in % je nach Baumart ....	102
Abbildung 6: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in cm je nach Baumart ...	102
Abbildung 7: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in % je nach Entfernung.....	103
Abbildung 8: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in cm je nach Entfernung.....	103
Abbildung 9: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in % je nach Durchmesser.....	104
Abbildung 10: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in cm je nach Durchmesser.....	104
Abbildung 11: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in % je nach Baumart ..	105
Abbildung 12: Vergleich händischer Daten und Laserscanndaten in cm je Baumart.....	105
Abbildung 13: Abhängigkeit des Durchmessers zur Genauigkeit .....	106
Abbildung 14: Datenverarbeitungsablauf .....	106
Abbildung 15: Bestimmung von nutzungsrelevanten Informationen aus Laserscanning ....	107
Abbildung 16: links: Erstellung eines Stichprobenkreises im Programm Layer2trees, rechts: Visualisierung des Stichprobenkreises mit entsprechenden Baumparametern .....	109
Abbildung 17: a) Intensitätsbild, b) Entfernungsbild, c) Grauwertbild.....	110
Abbildung 18: 1. Bestimmung des Interessengebietes, 2. Skeletonisierung, 3. Segmentierung, 4. Durchmesserbestimmung.....	111

Abbildung 19: .....	111
Abbildung 20: Datenverlauf .....	112
Abbildung 21: a) Entfernungsbild, b) interpoliertes Entfernungsbild, c) Segmentierung .....	113
Abbildung 22: Abholzigkeitsbestimmung durch Vergleich des Durchmessers in unterschiedlichen Höhen.....	115
Abbildung 23: Krümmung anhand der Mittelpunktskoodinaten in verschiedenen Höhen ...	115
Abbildung 24: Abhängigkeit zwischen Mittelpunktskoodinate und Baumhöhe .....	116
Abbildung 25: Ermittlung der Ovalität anhand von Ellipsenradien .....	116
Abbildung 26: Vergleich der Scannerdaten aus 2002 (rot) und Scannerdaten aus 2007 (grün).....	118
Abbildung 27: Programmablauf.....	119
Abbildung 28: VRML und Erstellung der Durchmesserscheiben in verschiedenen Höhen.....	120
Abbildung 29: Vergleich der Durchmesserscheiben aus den Jahren 2002 (grün) und 2007 (rot).....	120
Abbildung 30: Durchmesservergleich 2002/2007 in verschiedenen Höhen.....	121

## 6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ansatz 1a: BHD-Vergleich-Entfernung .....	99
Tabelle 2: Ansatz 2a: BHD-Vergleich-Durchmesser .....	100
Tabelle 3: Ansatz 3a: BHD-Vergleich-Baumart .....	102
Tabelle 4: Di7m-Vergleich-Entfernung .....	103
Tabelle 5: Di7m-Vergleich-Durchmesser .....	103
Tabelle 6: Di7m-Vergleich-Baumart .....	104
Tabelle 7: Ergebnisse der Gesamtbestands- und Einzelbaumanalyse .....	114

## 7 Literaturverzeichnis

- BIENERT, A., SCHELLER, S. (2008): Verfahren zur automatischen Bestimmung von Forstinventurparametern aus terrestrischen Laserscannerpunktwolken. DGPF Tagungsband 17 / 2008

- BIENERT, A., SCHELLER, S., KEANE, E., MULLOOLY, G., MOHAN, F. (2007a): Automatische Erfassung forstinventur-relevanter Geometrieparameter von Waldbäumen aus terrestrischen Laserscannerdaten. Oldenburger 3D-Tage 2007
- BIENERT, A., SCHELLER, S., KEANE, E., MOHAN, F., NUGENT C. (2007b): Tree detection and diameter estimations by analysis of forest terrestrial laserscanner point clouds. ISPRS Workshop on Laser Scanning 2007 and SilviLaser 2007, Espoo, September 12-14, 2007, Finland
- LIANG, X., LITKEY, P., HYYPPÄ, J., KUKKO, A., KAARTINEN H., HOLOPAINEN, M. (2008): Plot-level trunk detection and reconstruction using one-scan-mode terrestrial laser scanning data. International Workshop on Earth Observation and Remote Sensing Applications
- LITKEY, P., LIANG, X., KAARTINEN, H., HYYPPÄ, J., KUKKO, A., HOLOPAINEN, M. (2008): Single-scan TLS methods for forest parameter retrieval. SilviLaser 2008, Sept. 17-19, 2008 – Edinburgh, UK
- MOORTHY, I., MILLER, J. R., HU, B., CHEN, J., LI Q. (2008): Retrieving crown leaf area index from an individual tree using ground-based lidar data. Can. J. Remote Sensing, Vol. 34, No. 3, pp. 320-332, 2008
- PAL, I. (2008): Measurements of forest inventory parameters on terrestrial laser scanning data using digital geometry and topology. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B3b. Beijing 2008
- PAL, I. (2007): Numerische- und digital-geometrische Methoden für die automatische Bestimmung von forstrelevanten Größen aus 3D Laserscanning-Daten. DVFFA – Sektion Ertragskunde, Jahrestagung 2007 (21-23. Mai)
- VAN DER ZANDE, D., JONCKHEERE, I., STUCKENS, J., VERSTRAETEN, W., COPPIN, P. (2008a): Sampling design of ground-based lidar measurements of forest canopy structure and its effect on shadowing. Can. J. Remote Sensing, Vol. 34, No. 6, pp. 526-538, 2008
- VAN DER ZANDE, D., JONCKHEERE, I., STUCKENS, J., VERSTRAETEN, W., COPPIN, P. (2008b): Impact of the sampling design on the quality of ground-based LiDAR datasets. SilviLaser 2008, Sept. 17-19, 2008 – Edinburgh, UK

## 8 Anhang

Kein Anhang

# Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik

Institut für Forstbenutzung und Forstliche  
Arbeitswissenschaft

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

## Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	Förderkennzeichen: 0330616A
Vorhabenbezeichnung: MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik	
Bernd Becker Thomas Smaltschinski	
Laufzeit des Vorhabens: 1. September 2005 bis 31. Dezember 2008	
Berichtszeitraum: 1. September 2005 bis 31. Dezember 2008	

## **MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung**

### **Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik**

Bernd Becker, Thomas Smaltschinski

Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Universität Freiburg

Freiburg, Juni 2009

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Kurze Darstellung des Teilvorhabens</b>	<b>136</b>
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	136
1.2	Vorraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	136
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	137
1.4	Wissenschaftliche und technische Anknüpfung	137
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	138
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>138</b>
2.1	Erzielte Ergebnisse	138
2.2	Aufbau und Komponenten des „Warenlager Wald“	141
2.2.1	Datengrundlage	142
2.2.2	Ermittlung waldwachstumskundlicher Kenngrößen eines Bestandes aus den Erhebungen der Forsteinrichtung und der Betriebsinventur in Baden-Württemberg	142
2.2.3	Ableitung von Nutzungsmengen, Sorten und Aufarbeitungskosten	159
2.2.4	Allokation und Logistik	165
2.2.5	Routing auf räumlichen Netzwerken	166
2.2.6	Gruppenbildung	169
2.2.7	Optimale Erntereihenfolge	176

2.2.8	Fazit	176
2.3	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans	177
2.4	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	177
2.5	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	178
<b>3</b>	<b>Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht</b>	<b>181</b>
3.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	181
3.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen	181
3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	183
3.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	183
3.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)	183
3.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	183
<b>4</b>	<b>Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)</b>	<b>184</b>
<b>5</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>186</b>
<b>6</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>188</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>188</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>190</b>

# 1 Kurze Darstellung des Teilvorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Das Teilprojekt 2: Forest Warehouse hat die folgende Forschungsziele verfolgt:

- die Abschätzung der sich aus Inventurdaten und waldbaulichen Rahmenbedingungen ergebenden Nutzungsmengen nach Baumarten, Sorten und Qualität
- die Zuordnung der inventurmäßig erfassten Rohholzmerkmale zu Produkthanforderungen der Holzindustrie („Matching“)
- die Entwicklung einer innerbetrieblichen Logistik zur Zusammenführung räumlich getrennter Bestände zu Nutzungseinheiten anhand bestimmter Kriterien wie Sorten, Qualitäten, Erntezeitpunkte oder Geländemerkmale
- die Entwicklung eines Konzepts, um für die genannten Ziele Daten und Services zusammenzuführen und auszutauschen.

Als Modellregion dienten Referenzflächen, die sich von Freiburg nach Karlsruhe und die sich vom Rheintal über die Vorbergzone bis in die Hochlagen des Schwarzwaldes erstrecken. Daraus ergab sich eine vielfältige naturräumliche Ausgestaltung mit den wichtigsten Bestandestypen als auch unterschiedlichen Standorts- und Geländegegebenheiten. Bedingt durch diese naturale Ausstattung des Referenzgebietes können Ergebnisse auf breiter Basis (Deutschland und Mitteleuropa) übertragen werden.

Für dieses Gebiet lagen neben Laserdaten und Orthophotos des Landesvermessungsamtes Baden-Württemberg auch Informationen über die bestockten Waldflächen zur Verfügung. Für die Landesforstbetriebe und die Gemeinden konnten auf die Betriebsinventuren und Forsteinrichtungsdaten zugegriffen werden. Zudem wurden räumliche Daten des Landesumweltamtes (NSG, LSG, Biotope, etc.) für die Erreichung der Forschungsziele miteinbezogen.

## 1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

- Projektleiter für das Teilprojekt 2, der gleichzeitig die Projektleitung des gesamten Verbundprojektes ausübte
- ein Projektbearbeiter für die Unterprojekte 1 bis 3 (AZ1: holztechnologische Parameter, AZ2: Analyse der Inventurdaten, AZ3: Nutzungsstrategien und Nutzungsmengen)

- ein Projektbearbeiter für das Unterprojekt 4 (AZ4: Innerbetriebliche Logistik)
- Anleitung von wissenschaftlichen Hilfskräften
- Nutzungsvereinbarungen und –rechte regelten die Verfügbarkeit und Verwendung der erwähnten Datenquellen

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Das Vorhaben konnte sowohl zeitlich als auch inhaltlich weitgehend entsprechend der Planung in der Projektbeschreibung umgesetzt werden, auf deren Grundlage der Zuwendungsbescheid erstellt wurde. Die Projektlaufzeit wurde um 4 Monate verlängert, da tragischerweise während der Projektlaufzeit ein für den Projektfortschritt, insbesondere für gemeinsame Datenhaltung und Datenverarbeitung, entscheidender Mitarbeiter (Herr Jürgen Bayer) verstorben ist, wodurch es zu einer deutlichen Verzögerung gekommen ist.

### **1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfung**

Die Optimierung von Ernte- und Holztransport in einem integrierten GIS-gestützten System ist unter den komplexen Waldstruktur- und Waldbesitzerverhältnissen in Deutschland zwar vielfach gefordert (BECKER, 1997), aber bislang nur in Ansätzen realisiert worden. Integrierte Modelle zur verwendungsorientierten Erfassung vorhandener Holzressourcen und zur optimalen Allokation von Holznutzung und Produktlinien waren dementsprechend nicht bekannt. Bisherige Untersuchungen zielten vor allem darauf ab, Teilaspekte der Wertschöpfungskette zwischen Wald und Werk bzw. zwischen Baum und Produkt zu optimieren.

In der Wissenschaft wurde am Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft der Universität Freiburg in den vergangenen Jahren methodisch orientierte Untersuchungen durchgeführt, mit dem Ziel, die gesamte Wertschöpfungskette zwischen Wald und Werk zu analysieren, zu optimieren und neu zu gestalten. Zu nennen sind hier Veröffentlichungen von BECKER (2004) zur „Prozessorientierung in der Forstwirtschaft“, die Dissertation von HUG (2004) über die „Optimierung von Geschäftsprozessen in der Forstwirtschaft durch den Einsatz von Informationstechnologien am Beispiel der Holzbereitstellungskette auf Revierebene“ oder die maßgeblichen Beteiligung des Instituts an dem EU-Projekt LINSET, wo durch geeignete und frühzeitige Kennzeichnung von Stammkollektiven und Einzelstämmen die Möglichkeit eröffnet wurde, den einzelnen Baum bzw. den einzelnen Stamm bis in die nächste Produktionsstufe hinein zu identifizieren und zu kontrollieren. Kürzlich abgeschlossene Projekte wie die Dissertation von BAUMANN (2009) haben sich ebenfalls mit der Optimierung der Wald-Holz-Kette unter Nutzung moderner Informations-

und Kommunikationstechnologien beschäftigt. In dem EU-Projekt EFORWOOD werden erstmals alle Prozesse der gesamten europäischen Wald-Holz-Prozesskette (WHK) in eine Nachhaltigkeitsanalyse einbezieht. Dabei werden Indikatoren zur Leistungserhebung und -quantifizierung der WHK verwendet und stützt sich auf ökonomische, ökologische und soziale Nachhaltigkeitsaspekte. Das Institut befasst sich dabei schwerpunktmäßig mit dem Bereich der Holzernte und des Transportes, einschließlich der Holzqualität und Allokation.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Die Zusammenarbeit mit anderen Stellen erfolgte vor allem projektintern mit den Forschungspartnern der Universität Freiburg und der Forstlichen Versuch- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg.

Zudem erfolgte eine Zusammenarbeit mit den Praxispartnern Fürstlich Fürstenbergische Forstverwaltung (FFS) als auch mit der Forstwirtschaftlichen Vereinigung Mittlerer Schwarzwald (FMS). Mit der FMS wird derzeit über eine weitere Zusammenarbeit im Bereich der produktspezifischen Zuordnung von Rundholz an die Holzindustrie unter Verwendung moderner Informations- und Kommunikationstechnologien diskutiert.

## **2 Eingehende Darstellung**

### **2.1 Erzielte Ergebnisse**

Für die an der Forst-Holz-Wertschöpfungskette beteiligten Forstbetriebe ist es eine wichtige Zielsetzung, die Holzindustrie nachhaltig und kostengünstig mit dem jeweils geforderten Rohstoff Holz zu versorgen. Dies erfordert einen schnellen und differenzierten Zugriff auf das „Warenlager Wald“. Dazu sind lagegenaue und detaillierte Informationen über die Nutzungsbestände mit den voraussichtlichen zu erwartenden Holzsorten, Dimensionen und Qualitäten erforderlich. Diese Informationen sind aus den vorhandenen Forsteinrichtungsunterlagen und aus den überregionalen und betrieblichen Inventurergebnissen nicht ohne weiteres ableitbar.

Eine kunden- und produktorientierte Zuordnung der verschiedenen Rohholzsortimente an die Unternehmen der Holzindustrie unter Berücksichtigung optimaler Transportwege bringt Kostenvorteile und erlaubt eine zusätzliche Wertschöpfung, von der sowohl die Forstwirtschaft als auch die Holzindustrie profitieren können. Das Projekt MatchWood zielt

darauf ab, diese vorhandenen Informationen über Methoden der Fernerkundung und nachfolgende mathematische Kompilationen aller sonstigen Informationsquellen zu ergänzen, um Forstbetrieben und der Holzindustrie die notwendige Basis für eine ökonomisch sinnvolle Entscheidungsfindung bereitzustellen.

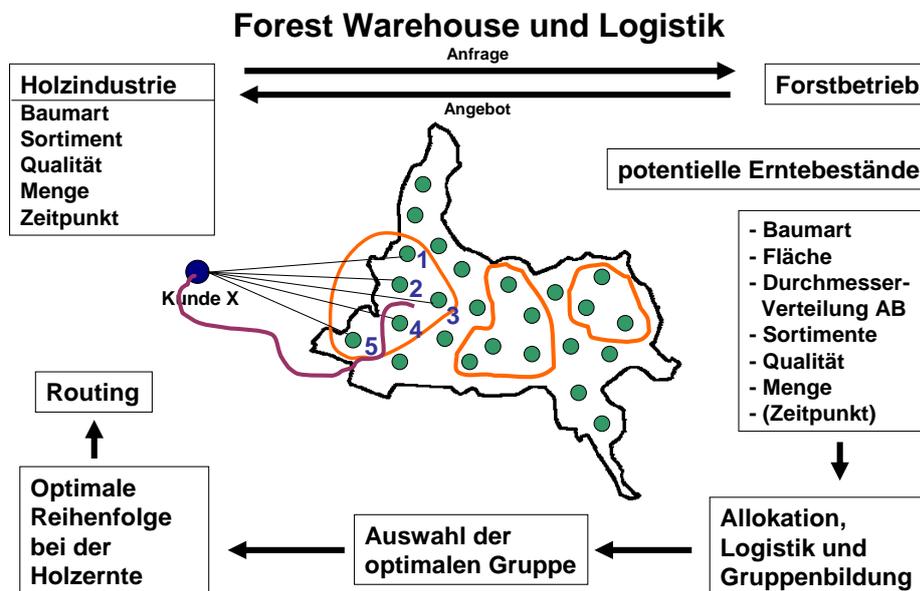


Abbildung 1: Logistik einer nachfrageorientierten Bereitstellung von Rundholz

In Abbildung 1 ist die prozessorientierte Logistikkette einer nachfrageorientierten Bereitstellung von Rundholz exemplarisch dargestellt. Diese Logistikkette besteht aus folgenden Gliedern:

- Ein Unternehmen der Holzindustrie stellt eine Anfrage an einen Forstbetrieb, ob Rundholz lieferbar ist, welches gewisse Anforderungen hinsichtlich Baumart, Sortiment, Qualität, Menge und Zeitpunkt der Bereitstellung erfüllt.
- Der Forstbetrieb selektiert aus seinen Beständen die potentiellen Erntebestände, die die gestellten Anforderungen erfüllen. Dazu ist eine räumliche Datenbank notwendig, die die entsprechenden Informationen enthält (Baumarten, Baumartenzusammensetzung, Flächen und Lage der Bestände, Durchmesserverteilung des ausscheidenden Bestandes zu erwartenden Qualitäten und Mengen, Erntezeitpunkt, Ernteverfahren, Erntekosten). Die potentiellen Erntebestände sind in Abbildung 1 als grüne Punkte dargestellt.
- Bei zu vielen Erntebeständen, die zudem die angefragten Mengen überschreiten, wird zunächst eine Clusteranalyse auf dem räumlichen Netzwerk der Waldwege gerechnet und Gruppen von Erntebeständen gebildet. Aus diesen Gruppen kann nach waldbaulichen, ökonomischen oder transporttechnischen Kriterien die optimale

ausgewählt werden. In Abbildung 1 wurde die Gruppe mit den kürzesten Transportwegen zwischen Wald und Werk ausgewählt.

- Innerhalb einer solchen Gruppe oder besser Holzernteeinheit wird anschließend die optimale Reihenfolge bei der Holzernte berechnet, so dass die Umsetzzeiten und Wege zwischen den Erntebeständen möglichst gering sind.
- Im Anschluss wird der bestmögliche Weg zwischen dem Polter im Wald und der anfragenden Werk berechnet. Diese Navigationslösung ermöglicht ein direktes Aufsuchen der Polter ohne Ortskenntnisse. Durch die Berechnung der optimalen Strecke zum Werk wird die Belastung von Waldwegen und öffentlichen Straßen auf ein Minimum reduziert. Dies reduziert die Kosten der Wegeinstandhaltung und die Emissionen beim Holztransport.
- Der Forstbetrieb kann nach diesen Vorüberlegungen ein ökonomisch begründetes und anforderungsgerechtes Angebot für den Käufer erstellen.

Diese logistische und prozessorientierte Planung des Forstbetriebes nutzt die Verschneidung von Nutzungsinformationen und räumlichen Daten aus, wie sie in einem Informationssystem aus Sach- und räumlichen Daten abgebildet sein müssen, welches das „Warenlager Wald“ (Forest Warehouse) kennzeichnet. Dieser Vorgang wird innerhalb des MatchWood-Projektes als „Matching“ bezeichnet.

Das „Warenlager Wald“ setzt sich aus unterschiedlichen Komponenten und Modulen zusammen. Abbildung 2 zeigt den Aufbau des „Warenlagers Wald“. Die Erstellung dieses „Warenlagers Wald“ ist ein komplexer Vorgang, bei dem waldwachstumkundliche und inventurtechnische Berechnungen mit vorhandenen Programmen zur Waldwachstumssimulation und zur Kalkulation von Sortimenten und Erntekosten ineinander greifen müssen, damit die Sachdatenbank des „Warenlagers Wald“ gefüllt werden kann.

Zur Kalkulation des Waldwachstums und der Durchmesser- und Qualitätsgliederung des ausscheidenden Bestandes wurde der Waldwachstumssimulator „W+“ und für die Sortiments- und Qualitätsgliederung das Programm „Holzernte 7.1“. Beide Programme wurden von der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg für dieses Forschungsvorhaben zur Verfügung gestellt. Zur räumlichen Darstellung und Visualisierung des „Warenlagers Wald“ wurde das geographische Informationssystem ArcGIS 9.x der Firma ESRI verwendet.

## 2.2 Aufbau und Komponenten des „Warenlager Wald“

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte und Komponenten des „Warenlagers Wald“ (Abbildung 2) vorgestellt.

### Aufbau und Komponenten Forest Warehouse

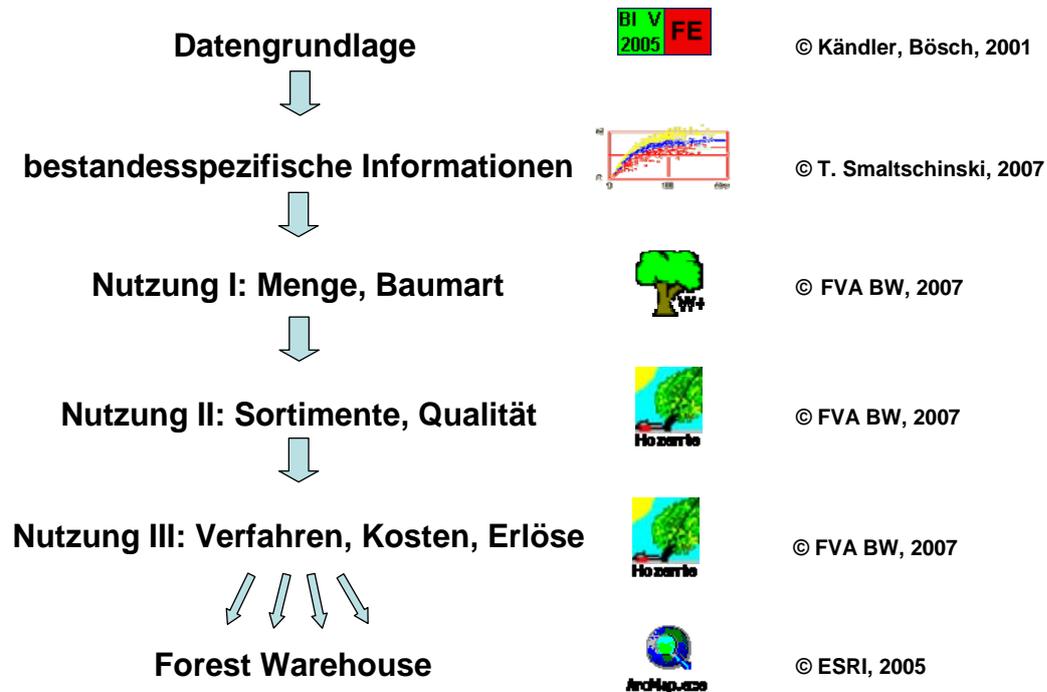


Abbildung 2: Aufbau und Komponenten des "Warenlager Wald"

## 2.2.1 Datengrundlage

Als Datengrundlage für eine nachfrageorientierte Bereitstellung von Rundholz und einer Optimierung der innerbetrieblichen Logistik werden folgende Datensätze benötigt:

- Forsteinrichtung
- Betriebsinventur
- räumliche Informationen über das öffentliche sowie land- und forstwirtschaftliche Wegenetz sowie der Abgrenzung der Bestände
- digitales Geländemodell
- Luftbilder / Orthophotos

## 2.2.2 Ermittlung waldwachstumskundlicher Kenngrößen eines Bestandes aus den Erhebungen der Forsteinrichtung und der Betriebsinventur in Baden-Württemberg

### 2.2.2.1 Einleitung

Innerhalb des Projektes MatchWood sind bestandesbezogene Werte hinsichtlich der Vorräte, Durchmesserverteilungen und Baumhöhen nach Baumarten getrennt notwendig, um das „Warenlager Wald“ zu definieren, aus dem man marktabhängig passgenau Kundenanforderungen hinsichtlich Sortiment, Qualität und Menge befriedigen kann.

Zu Beginn des Projektes sah es so aus, als ob zumindest für den Staats- und Gemeindewald aus der Betriebsinventur (BI) alle Daten zu Verfügung stünden. Dies erwies sich als Trugschluss. Die BI liefert für einen ganzen Forstbezirk statistisch abgesicherte Werte über waldwachstumskundliche Werte (d.i. nach Baumarten und Alter getrennt: Vorrat, Höhe, Durchmesserverteilung, minimaler und maximaler Durchmesser, Formzahl, Baumzahl/ha, und Mittelwerte zu all diesen Größen). Die Bezugsgröße sind aber die unscharfen Grenzen der landesspezifisch definierten Waldentwicklungstypen (WET). Die BI bezieht sich auf exakt diese Straten. Die Holzernte hingegen bezieht sich auf die administrative Einteilung nach Beständen. Deren Grenzen unterscheiden sich deutlich von den Stratengrenzen.

Eine Beschreibung der einzelnen Bestände wird alle zehn Jahre durch die Forsteinrichtung durchgeführt. Dabei wird aber nur ein Teil der für MatchWood notwendigen Daten aufgenommen, wie die Baumartenzusammensetzung und Baumartenanteile, die Bonität (~Wachstumsgüte) pro Baumart, die Dringlichkeit der Nutzung und pauschal der Nutzungssatz/ha in m<sup>3</sup> für die nächsten 10 Jahre.

Diese Datenlage war für die Beantwortung der zentralen Frage von MatchWood, wie man den Markt mit den gewünschten Mengen nach Baumart, Sortiment und Qualität versorgen könne, nicht gerade förderlich. Zudem ergaben sich Probleme hinsichtlich der logistischen Optimierung der Holzernte und dem Abtransport. Was sollte man räumlich optimieren, wenn man nicht weiß, welche Orte gemeint sind?

Abgesehen von diesen auf MatchWood bezogenen Problemen ergibt sich ein viel allgemeineres Problem, welches nicht nur Baden-Württemberg betrifft, sondern alle Länder, die eine Stichprobeninventur ihrer Waldbestände durchführen. Stichprobeninventuren können generell nur über größere Gebiete statistisch abgesicherte Informationen liefern. Sobald eine verfeinerte Fragestellung auftritt (z.B. welche Vorräte sind im Alter 41-60 in der Baumart Eiche zu erwarten) dünnt der Stichprobenumfang derart aus, dass nur noch grob orientierende Antworten zu erwarten sind. Dies gilt insbesondere für eine Vorrats- oder Sortimentsfrage auf Bestandesebene mit keiner oder maximal zwei Stichproben.

Derartige Fragen wurden vor der Verwaltungsreform in Baden-Württemberg durch den zuständigen Revierleiter beantwortet, der aufgrund langjähriger Erfahrung in der Lage war, die Verhältnisse einigermaßen richtig einzuschätzen. Nach der Verwaltungsreform wurden die Forstbetriebe auf die einzelnen Landkreise verteilt, was die natürlich gewachsenen Forstbetriebsgrößen und -grenzen komplett durcheinanderwirbelte. Durch Neuordnung und Vergrößerung der Reviere können die Revierleiter nicht mehr auf ihre lokale Erfahrung zurückgreifen sondern nur noch auf die Ergebnisse der BI und der Forsteinrichtung. Eine geregelte Absatzgestaltung des zu erntenden Holzes als ein harmonisches Verhältnis zwischen Produktion und Güterverteilung (Marketing) ist deutlich gestört. Begriffe wie Marktversorgung, Flexibilität, Kundenwünsche oder Supply-Chain-Management treffen auf relativ starres Verwaltungsraster. Diese Situation trifft für den Staats- und Gemeindewald zu. Im Kleinprivatwald, der über ein Drittel der Fläche ausmacht und in dem nach der zweiten Bundeswaldinventur die größten Vorräte überhaupt liegen, verhält sich holzerntetechnisch weitgehend als terra incognita.

Im Folgenden sollen die Erhebungen der BI und der Forsteinrichtung so zusammengeführt werden, dass eine praktikable Datengrundlage für die Anforderungen von MatchWood entsteht.

### **2.2.2.2 Datengrundlagen**

#### **Datengrundlagen Betriebsinventur**

Die BI wird seit etwas über 15 Jahren in Baden-Württemberg verwendet. Auf permanenten Stichproben mit der Rasterweite 100x200m werden auf permanent markierten Stichproben-

mittelpunkten die Baume in konzentrischen Probekreisen aufgenommen, wobei der Aufnahme-radius von der Baumgröße (Durchmesser oder Höhe) abhängt (Abbildung 3).



Abbildung 3: Verteilung der Stichprobenpunkte (100 x 200 m) bei der Betriebsinventur in einem Waldgebiet

Eine ausführliche Dokumentation und Literaturübersicht zur Betriebsinventur findet sich auf der Web-Seite der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) und der Stichwort „Betriebsinventur“ (<http://fva-bw.de>). Die Betriebsinventur wird an der FVA ausgewertet und die Ergebnisse der einzelnen Stichprobenpunkte liegen in einer relationalen Datenbank als normalisierte Tabellen vor. Für den hiesigen Zweck sind folgende Tabellen von Bedeutung:

- Baumarten
- dbo\_StichprobenMTW
- dbo\_strichproben
- dbo\_RWET

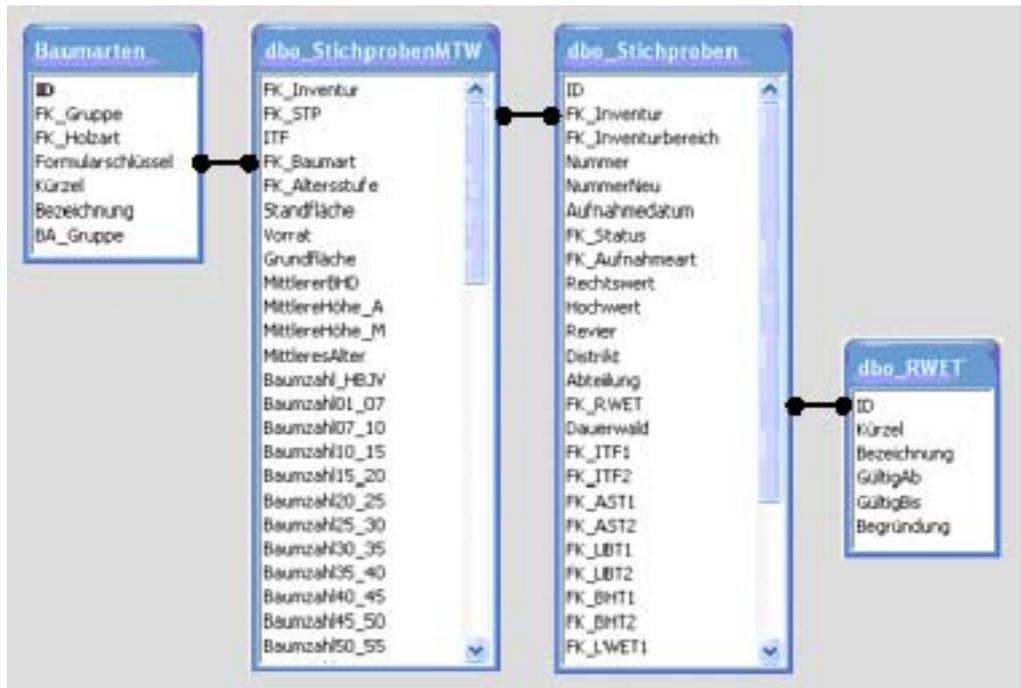


Abbildung 4: ER-Diagramm der Stichprobenauswertungen der BI

In Abbildung 4 sind die herangezogenen Tabellen und das zugehörige ER-Diagramm zusammengestellt. Die Tabelle Baumarten wurde neu konstruiert, da die verschiedenen Baumarten für das betrachtete Gebiet zu Baumartengruppen zusammengefasst wurden. Diese Zusammenfassung geschah nach folgendem Modus (Tabelle 1)

Tabelle 1: Zuordnung von Baumarten zu Baumartengruppen

BAUMARTEN-GRUPPE	BAUMART	ERTRAGSTAFEL
Fi	alle Fichten und sonstigen NB	Fi
Ta	alle Tannen	Ta
Ki	alle Kiefern	Ki
La	alle Lärchen	La
Dgl	alle Douglasien	Dgl
Bu	Bu, Marone, Roteiche, Wallnuss	Bu
eLB	Es, Ah, Kirsche	Es
aLh	Linde, Hainbuche, Ulmen	Li
aLn	Bi, Wei, Aspe, Ro, EEs, FAh (Pa)	Bi

Für die Bonitierung der Baumarten wurden die Ertragstafeln der Baumarten verwendet, die sich in der rechten Spalte von Tabelle 1 befindet.

Die Tabellen *Baumart* und *dbo\_StichprobenMTW* sind über die Attribute *Formularschlüssel* und *fk\_Baumart* miteinander verbunden. In der Tabelle *dbo\_StichprobenMT* stehen alle

relevanten waldwachstumskundlichen Daten, die zu dem einzelnen Stichprobenpunkt gehören. Die Koordinaten des Stichprobenpunktes selbst stehen in der Tabelle *dbo\_Stichproben* (Rechtswert, Hochwert) und der Waldentwicklungstyp in der Tabelle *dbo\_RWET*. Die korrespondierenden Attribute sind in den Tabellen von Abbildung 4 durch Verbindungslinien markiert.

### **Datengrundlagen Forsteinrichtung**

Die Forsteinrichtung ist als Schätzung anzusehen. Dabei wird mit Bezug auf den einzelnen Bestand eine ganze Reihe von planungsrelevanten Merkmalen taxiert, die in der Inventur ohne Bedeutung sind oder nur auf den Stichprobenpunkt zutreffen. Auf den Einzelbestand bezogen gehören dazu die:

- Baumartenzusammensetzung (5% Stufen)
- Nutzung/ha innerhalb der nächsten 10 Jahre (summarisch für alle Baumarten)
- Alter und Altersspreite pro Baumart
- Bonität ausgedrückt als durchschnittlicher Gesamtwuchs in 100 Jahren
- Dringlichkeit der Nutzung
- Waldentwicklungstyp (der überwiegend vertretene)
- ....
- ....
- Informationen über die Verjüngung

Von den erhobenen Merkmalen sind die ersten fünf für das Projekt MatchWood von Bedeutung.

#### **2.2.2.3 Bestandesbezogene Auswertung der Betriebsinventur**

Auch wenn die Ziele der Landesforsten in einem hochgradig gemischten Wald mit einer größeren Altersspreite bei den einzelnen Baumarten liegen, sind noch überwiegend einschichtige Hochbestände anzutreffen, die den hergebrachten Altersklassenaufbau aufweisen. Die Auswertung der BI erfolgte daher untypisch als Altersreihe für einzelne Baumartengruppen.

Mit Bezug auf das Gesamtprojekt MW sind als Eingangsdaten für den Waldwachstumsimulator W+ und das Holzernteprogramm (beide FVA) baumartenweise Angaben über

- Mittelhöhe
- Vorrat/ha
- Formhöhe
- mittlerer Durchmesser
- minimaler & maximale Durchmesser
- Durchmesserverteilung

notwendig.

Dazu wurden verschiedene Regressionsfunktionen verwendet, die den natürlichen Wachstumsverlauf auch bei geringem Datenumfang noch plausibel abbilden. Zum Ausgleich der Entwicklung der Mittelhöhe wurde ein gebrochenes Polynom verwendet, welches NÄSLUND 1963 als geeignetes Verfahren beschrieb.

$$h(t) = \frac{t^2}{a_0 + a_1 t + a_2 t^2} \quad [1]$$

Die Funktion ist vom Alter  $t$  in Jahren abhängig und hat die drei unbekannt Parameter  $a_0$  bis  $a_2$ , die sich nach leichter Transformation über die Methode der kleinsten Quadrate bequem schätzen lässt.

Für die Vorratsentwicklung in Abhängigkeit von der Zeit  $t$  in Jahren wurde als Regressionsfunktion die Differentialgleichung von MICHAÏLOFF (1943) verwendet.

$$\begin{aligned} \frac{dv}{dt} &= k d(1/t) \\ v(t) &= A \exp(-k/t) \end{aligned} \quad [2]$$

Das Ergebnis beider Auswertungen ist exemplarisch für die Baumart Fichte in Abbildung 5 zusammengestellt.

In Abbildung 5 bedeutet die blaue den eigentlichen Ausgleich. Die Daten für ein oberes und unteres Bonitätsniveau wurden gelb und rot eingefärbt und die zugehörige Regressionslinie wurde entsprechend gestreckt oder gestaucht.

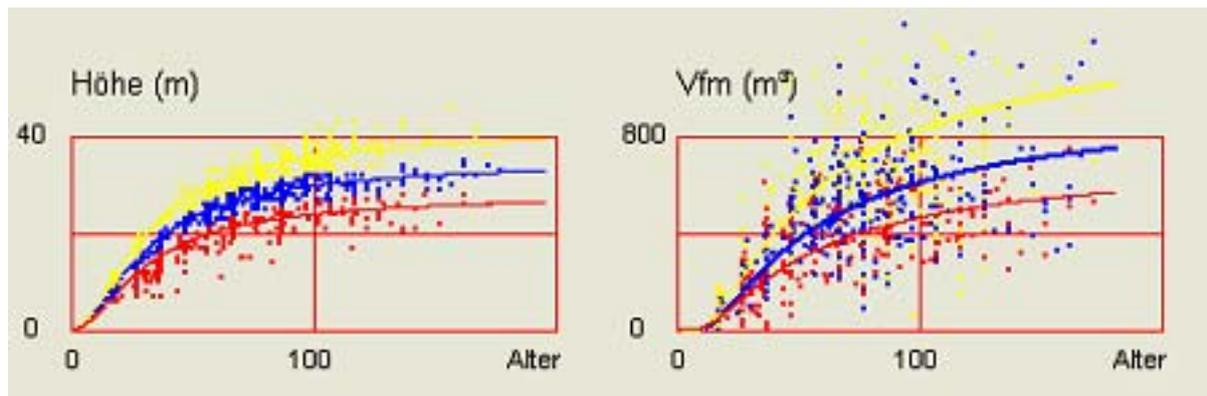
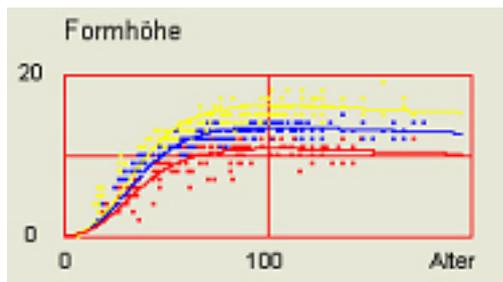


Abbildung 5: Ausgleich von Höhe und Vorrat über dem Alter als unabhängiger Variablen

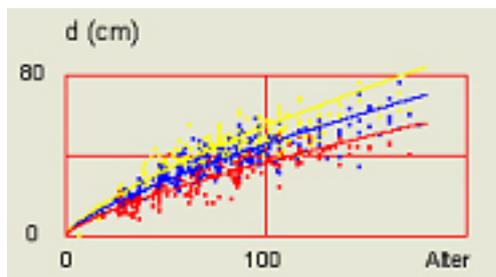
Die Zusammenhänge bei der Höhenentwicklung sind deutlich strenger als bei der Vorratsentwicklung. Die Farbgebung der einzelnen Stichprobenbäume aus der Höhenentwicklung wurde auf die Vorratsentwicklung übertragen. Die starke Streuung ist auf die Standflächenzuweisung bei der Auswertung der FVA zurückzuführen. Hier wurde den einzelnen Bäumen unabhängig vom begleitenden Bestand und Alter in Abhängigkeit vom erreichten Durchmesser ein Standraum zugewiesen, der aus der Ertragstafel abgeleitet wurde. Enthält ein einzelner Stichprobenpunkt möglicherweise nur einen stärkeren Baum, dann können relativ hohe und bei unklarer Alterszuordnung auch recht tiefe Vorratswerte entstehen. Um weiterreichende waldwachstumskundliche Diskussionen zu vermeiden, wurde die mittlere Regressionslinie ähnlich wie bei der Höhenentwicklung gestreckt und gestaucht und die Ausreißer blieben unberücksichtigt.

Für den Ausgleich von Formhöhe, Durchmesserentwicklung und minimalem und maximalem Durchmesser wurden die eben zitierte gebrochen rationale Funktion nach NÄSLUND [3] und Potenzfunktionen mit der Zeit [4] und dem Durchmesser [5] als Basis verwendet. Die verwendeten Funktionen und die Ergebnisse des Ausgleichs sind in den Abbildung 6 bis Abbildung 8 dargestellt. Die Farbgebung der Punkte korrespondiert auch hier mit der in Abbildung 5 links.



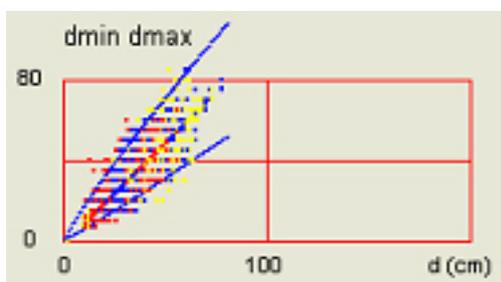
$$FH(t) = \frac{t^2}{a_0 + a_1 t + a_2 t^2} \quad [3]$$

Abbildung 6: Verlauf der Formhöhe über dem Alter und Ausgleich



$$d_g(t) = at^b \quad [4]$$

Abbildung 7: Durchmesserentwicklung über dem Alter

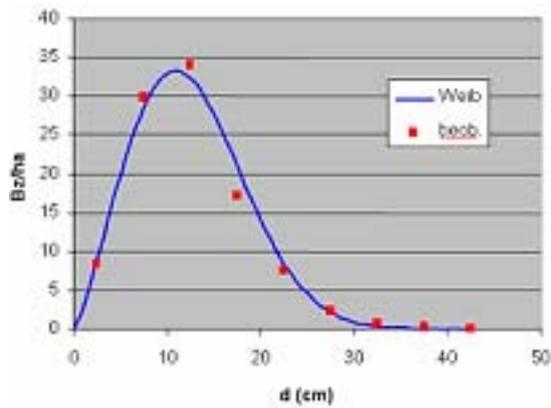


$$\begin{aligned} d_{\min}(d_g) &= ad_g^b \\ d_{\max}(d_g) &= ad_g^b \end{aligned} \quad [5]$$

Abbildung 8: Entwicklung von minimalem und maximalem Durchmesser in Abhängigkeit vom mittleren Durchmesser

Die Durchmesserverteilungen wurden für 20 jährige Altersklassen der einen Maximum Likelihood Schätzer angepasst (SMALTSCHINSKI, 1980). Die WEIBULL-Verteilung selbst besitzt die drei Parameter  $a$ ,  $b$  und  $c$  und hat folgende Form:

$$\begin{aligned} w(x) &= (c/b)(x/b)^{c-1} \exp(-(x/b)^c) \\ x &:= d - d_{\min} \end{aligned} \quad [6]$$



Dabei wurde für die unabhängige Variable  $d$  die Transformation  $x = d - d_{\min}$  durchgeführt. Die Anpassung der Verteilung ist ausgesprochen gut (Abbildung 9)

Abbildung 9: Anpassung der WEIBULL-Verteilung an einen Datensatz aus der BI

Die Parameter der Verteilung wurden für 20-jährige Altersklassen berechnet. In Abbildung 10 ist der Verlauf der Durchmesserverteilung nach Altersklassen zu sehen. Die Entwicklung zeigt die hohe linksschiefe Verteilung in der Jugend, die mit Zunahme des Alters flacher und symmetrisch wird und sich in höhere Durchmesserbereiche bewegt.

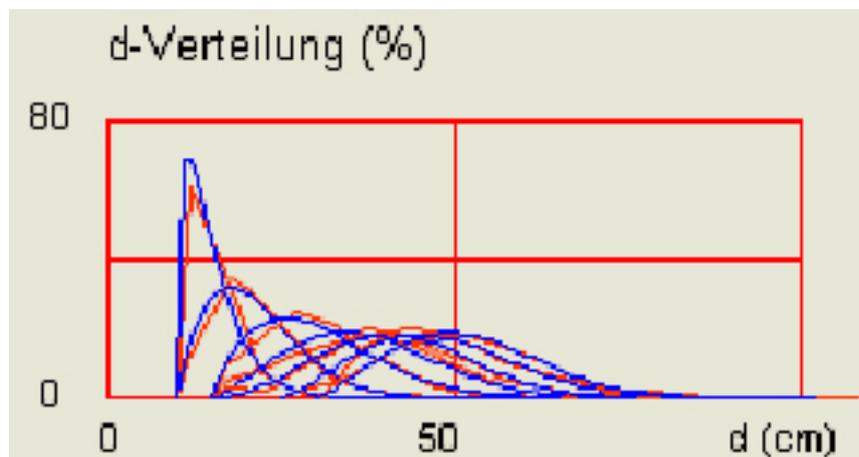


Abbildung 10. Entwicklung der Durchmesserverteilungen in 20-jährigen Altersklassen. Linke Verteilung Alter 21-40

Die Parameter der einzelnen Funktionen sind in der Tabelle 2 für Nadelbäume und in Tabelle 3 für Laubbäume zusammengestellt, wobei es sich hier um Baumartengruppen handelt, wie sie in Tabelle 1 zusammengestellt sind.

### 2.2.2.4 Waldwachstumskundliche Parenthese

In Baden Württemberg wird zur Beurteilung der Wachstumsgüte der Bestände eine Bonitierung nach dem insgesamt gewachsenen durchschnittlichen Derbholtzvolumen zum Alter 100 ( $dGz_{100}$ ) vorgenommen.

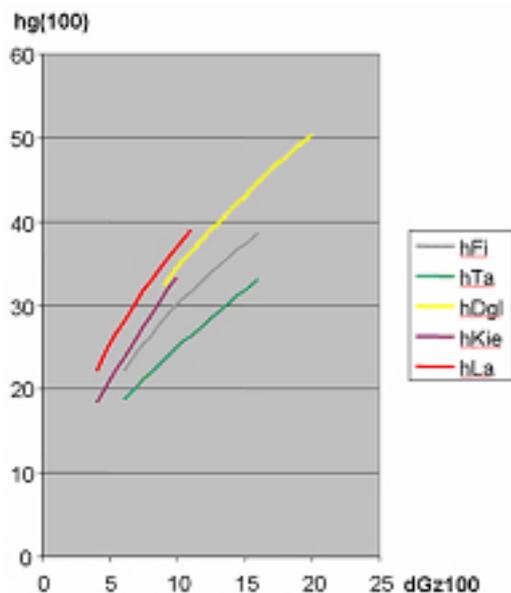


Abbildung 11. Höhe im Alter 100 über dem  $dGz_{100}$  aufgetragen (Nadelbaumarten)

Die Zahlenangaben sind in Ertragstafeln zusammengestellt (Hilfstabellen für die Forsteinrichtung der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg, Stuttgart 1966/1993). Die Tafeln selbst basieren auf der Ertragstafelsammlung von SCHOBER (1957), wobei die Relativbonitäten I bis V in absolute  $dGz_{100}$ -Bonitäten umgerechnet worden waren, was auf eine Forderung von WIEDEMANN 1939 zurückging. Die relativen Bonitäten der alten

Tafeln hatten zum Alter 100 äquidistante Abstände hinsichtlich der Mittelhöhe und

ursprünglich auch bei den Volum. Diese Äquidistant kann ausgenutzt werden, um  $dGz_{100}$ -Bonitäten in absolute Mittelhöhen-Bonitäten zum Alter 100 umzurechnen. Die Mittelhöhe der verwendeten Tafeln ist die sog: LOREY-Höhe; d.i. die grundflächengewichtete Mittelhöhe eines Bestandes.

Tabelle 2. Parameter der Funktionen [1] bis [6] für Nadelbaumarten

Funktion	Parameter	Fichte	Tanne	Kiefer	Lärche	Douglasie
<b>Näslund</b> Höhe	a0	18.8876	8.7903	22.8726	17.5439	10.5968
	a1	0.3726	0.7942	-0.5679	0.0587	0.7273
	a2	0.0283	0.0268	0.0450	0.0322	0.0171
<b>Michailoff</b> Vorrat	A	9695.1085	9484.4987	6014.8827	7113.9811	11981.1927
	k	-45.7621	-45.5912	-43.1953	-44.2560	-47.0108
<b>Näslund</b> Formhöhe	a0	203.4016	217.9812	261.6677	270.0607	212.0024
	a1	-3.9645	-3.7479	-5.5645	-6.0214	-4.3680
	a2	0.0944	0.0876	0.1219	0.1093	0.0891
<b>Potenzfkn.</b> Durchmesser (D) min-D max-D	a	1.4637	1.9301	6.9572	7.7039	1.0598
	b	0.7436	0.6889	0.3764	0.3649	0.9128
	a	0.6054	0.6003	0.3047	0.5148	0.5014
	b	1.0625	1.0748	1.2840	1.1456	1.1250
	a	1.9169	2.0679	4.1224	1.9940	2.1225
	b	0.8766	0.8535	0.6470	0.8411	0.8424
<b>Weibull</b> D-Verteilung	Altersklasse	0	0	0	0	0
	a	10	10	40	45	10
	b	5.3088	6.0048	14.3993	0.0000	10.2309
	c	1.25	1.25	1.75	0	1.75
	Altersklasse	1	1	1	1	1
	a	10	10	20	20	10
	b	12.4662	11.1111	6.2635	11.2330	19.8252
	c	1.75	1.25	1.25	2.75	2.25
	Altersklasse	2	2	2	2	2
	a	15	15	20	15	20
	b	17.0629	19.2360	16.5696	18.2853	25.3939
	c	1.75	1.75	2.25	1.75	2.25
	Altersklasse	3	3	3	3	3
	a	15	15	20	15	15
	b	24.6951	27.4204	15.6842	25.5368	44.2244
	c	2.25	2.25	1.75	2.25	2.75
	Altersklasse	4	4	4	4	4
	a	15	20	25	30	20
	b	29.9288	30.9168	17.9647	12.5530	44.6098
	c	2.75	2.75	1.75	1.25	2.75
	Altersklasse	5	5	5	5	5
	a	25	25	35	40	35
	b	25.7689	30.6219	5.1763	9.6914	26.4879
	c	2.25	2.25	1.25	1.75	1.75
Altersklasse	6	6	6	6	6	
a	30	25	10	30	35	
b	24.8694	35.2565	28.6882	17.7581	0.0000	
c	2.25	2.75	1.25	1.25	0	

Tabelle 3: Parameter der Funktionen [1] bis [6] für Laubbaumarten

Funktion	Parameter	Buche	eLB	aLn	aLh
<b>Näslund</b> Höhe	a0	22.6267	32.3164	101.2109	13.0804
	a1	-0.1288	-0.7608	-2.8425	0.1725
	a2	0.0380	0.0473	0.0722	0.0376
<b>Michailoff</b> Vorrat	A	6073.7684	4958.9471	4488.3982	5746.8547
	k	-43.3297	-42.0530	-42.0426	-42.2031
<b>Näslund</b> Formhöhe	a0	213.2824	208.7264	320.4632	193.1333
	a1	-3.4732	-3.6287	-7.7374	-4.8428
	a2	0.0889	0.0993	0.1532	0.1136
<b>Potenzfkn.</b> Durchmesser (D) min-D max-D	a	1.7144	1.8587	2.6827	2.2284
	b	0.6735	0.6536	0.5473	0.6383
	a	0.6983	0.7558	0.6823	0.7190
	b	1.0384	1.0401	1.0729	1.0594
	a	1.8254	1.7683	1.5463	1.5146
	b	0.8782	0.8756	0.8982	0.9104
<b>Weibull</b> D-Verteilung	Altersklasse	0	0	0	0
	a	10	10	10	15
	b	4.3124	5.6493	5.4130	3.4076
	c	1.75	0.75	0.75	2.25
	Altersklasse	1	1	1	1
	a	10	15	15	15
	b	8.5348	4.4104	3.8886	9.1334
	c	1.75	1.25	1.75	1.25
	Altersklasse	2	2	2	2
	a	15	15	20	15
	b	14.3990	14.7024	9.3326	13.1932
	c	1.75	2.25	2.25	1.25
	Altersklasse	3	3	3	3
	a	15	15	25	20
	b	19.7485	21.6077	7.9159	18.3755
	c	2.25	2.25	1.25	2.25
	Altersklasse	4	4	4	4
	a	15	20	25	30
	b	28.5978	24.1551	6.2744	6.7580
	c	2.75	2.25	1.25	1.75
	Altersklasse	5	5	5	5
	a	25	30	40	25
	b	19.9657	15.1204	6.3153	17.3776
	c	1.75	1.75	2.75	1.25
Altersklasse	6	6	6	6	
a	15	30	30	50	
b	34.4058	18.1137	12.4375	0.0000	
c	2.75	1.25	1.75	0	

In Abbildung 11 und Abbildung 12 ist der annähernd lineare Zusammenhang zwischen den dGz100-Bonitäten und den Mittelhöhen zum Alter 100 zu sehen. Abbildung 11 bezieht sich auf die behandelten Nadelbaumarten der Tafeln und Abbildung 12 auf die Laubbaumarten.

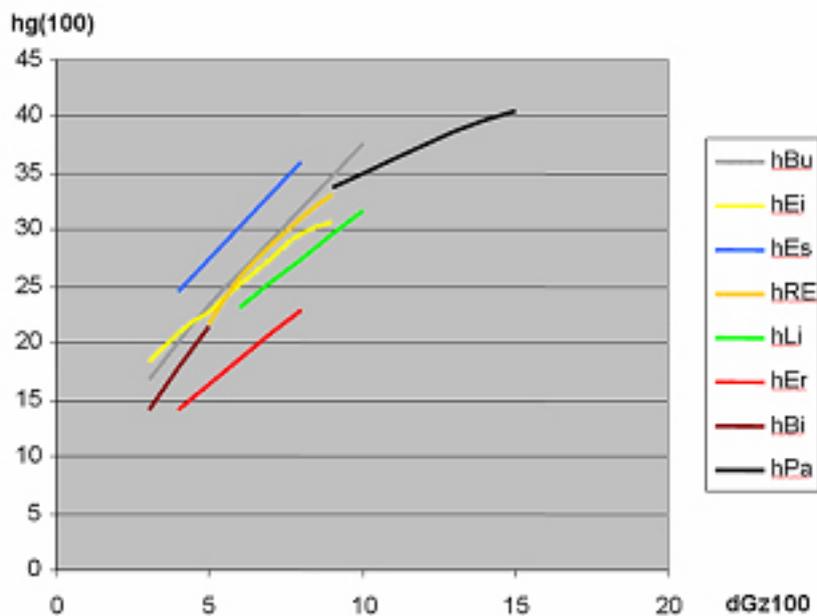


Abbildung 12: Höhe im Alter 100 über dem  $dGz_{100}$  aufgetragen (Laubbaumarten)

Der Forsteinrichter gibt bei seinen Aufnahmen nur die  $dGz_{100}$ -Bonität an. Für die weiteren Auswertungen ist aber die Mittelhöhe eines Bestandes zum jeweiligen Alter notwendig. Dazu wurde die von SLOBODA 1971 entwickelte lineare homogene partielle Differentialgleichung erster Ordnung verwendet, um die Höhenentwicklung der Ertragstafeln für alle Bonitäten abzubilden. Die Funktion besitzt die reellen Parameter  $a$ ,  $b$  und  $d$  ist von zwei Variablen abhängig: dem Alter  $t$  und der Bonität  $B$  zu einem konstanten Bonitierungsalter  $t_B$ . Sie besitzt folgende Form:

$$SL(t, B) = d(B/d)^{\exp(f(t))} \quad \text{mit} \quad f(t) = b(t^{-a} - t_B^{-a})/a. \quad [7]$$

Über die erste Ableitung von  $SL$  nach der Zeit ist der laufende Zuwachs zu gegebener Bonität  $B$  direkt berechenbar:

$$SL'_t(t, B) = SL(t, B) f' \exp(f(t)) \ln(B/d) \quad [8]$$

SLOBODA (1971) konstruierte die Funktion  $SL$  weiterhin so, dass sie umkehrbar ist. Über die Umkehrbarkeit von  $SL$  lassen sich Beobachtungswerte von Höhe und Alter direkt bonitieren.

Nach Umrechnung von Gleichung [7] ergibt sich für einen Beobachtungswert  $SL(.)$  zu einem gegebenen Alter  $t_x$  direkt die Bonität

$$B = d(SL(.) / d)^{1/\exp(f(t_x))} \quad [9]$$

Für paarweise Kombinationen von Alter, Höhe und Bonität lässt sich über die Gleichungen [7] bis [8] immer der dritte fehlende Wert direkt berechnen. Die direkte Berechenbarkeit all dieser Werte bei geringer Parameterzahl macht diese Funktion zu einem sehr flexiblen Instrument für den hiesigen Zweck.

Die Parameter der Funktion wurden von SMALTSCHINSKI (2001) für regionale Waldwachstumsprognosen berechnet. Für die Hauptbaumarten sind die Werte in Tabelle 4 zusammengestellt

*Tabelle 4: Parameter a, b und d der Ausgleichsfunktion SL [7] für die Baumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer zum Bonitierungsalter 100*

Baumart	a	b	d
Buche	-0.3815	1.7731	218.4652
Eiche	-0.0693	0.7387	59.3169
Fichte	-0.0672	0.9530	68.0714
Kiefer	-0.5452	2.3575	244.2882

An der linearen Abhängigkeit von  $dGz_{100}$  zu Mittelhöhe im Alter 100 kann zunächst die Höhe zum Alter 100 ermittelt werden. Diese Höhe entspricht in Gleichung [7] direkt der Bonität B, so dass für die jeweilige Baumart die Altershöhenkurve berechenbar ist. Aus dieser Kurve kann dann die Höhe eines Bestandes zum dem Alter berechnet werden, als der Forsteinrichter den Bestand taxierte.

In Abbildung 13 ist der geschilderte Rechengang nochmals graphisch aufbereitet.

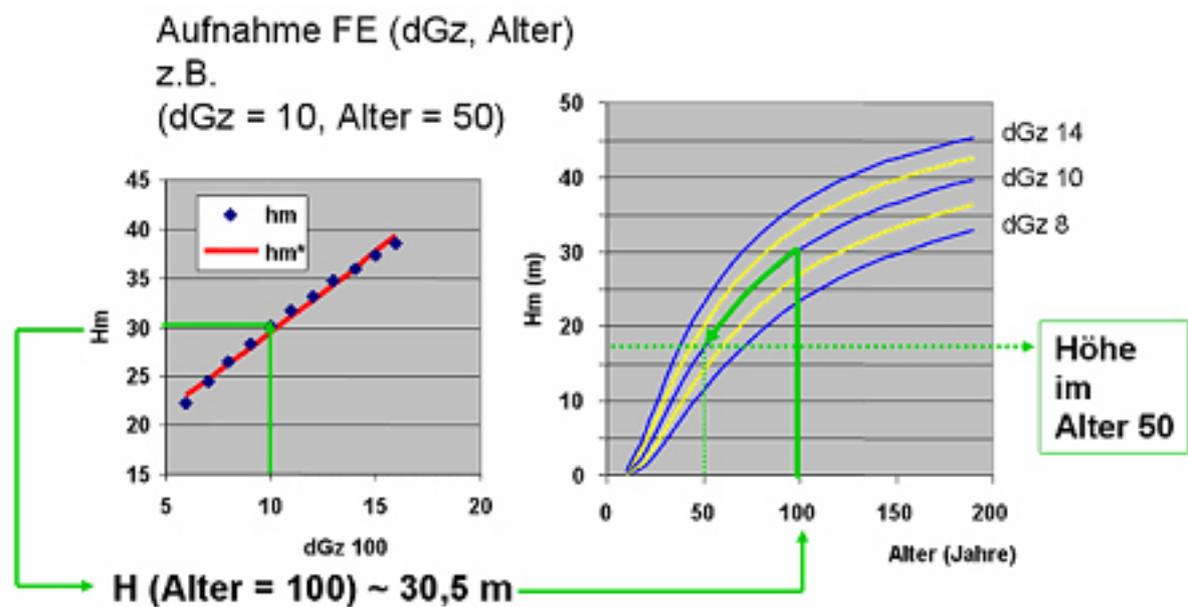


Abbildung 13: Berechnung der Mittelhöhe eines Bestandes über die Aufnahmedaten der Forsteinrichtung (Alter,  $dGz_{100}$ ) und den Alterhöhenfächer nach Gleichung [7]

Aus der Einschätzung des  $dGz_{100}$  durch den Forsteinrichter kann über das geschilderte Vorgehen die Höhe des Bestandes zum gegebenen Alter abgeleitet werden ( $H_{FE}$ ). Aus der Betriebsinventur lassen sich die Höhenwerte über dem Alter auftragen und durch Gleichung [1] ausgleichen. In Abbildung 14 sind die Höhenwerte und der Ausgleich dargestellt. Dabei bezeichnet die Farbe Blau einen mittleren Bonitätsbereich, Rot und Gelb einen unteren resp. oberen Bonitätsbereich.

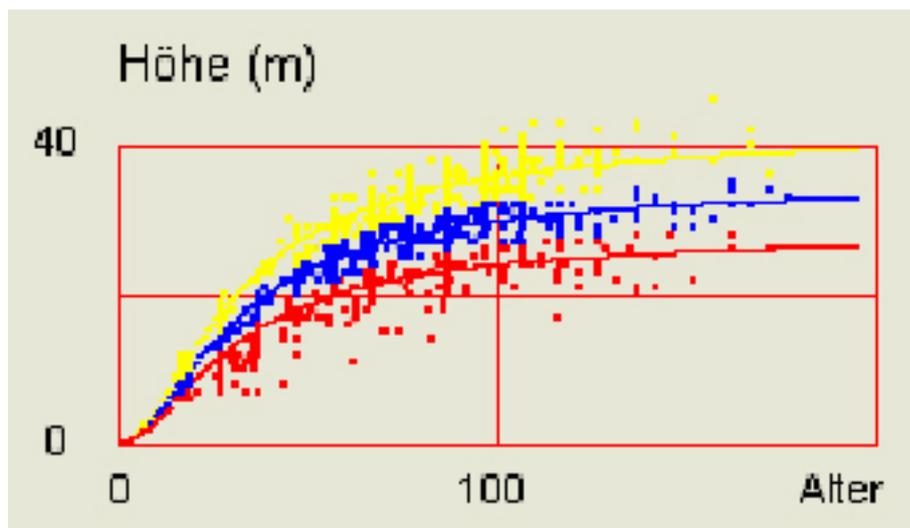


Abbildung 14: Baumhöhen BI über dem Alter aufgetragen. Blaue Linie: Ausgleich nach [1]. Weitere Erläuterungen siehe Text

Aus der berechneten Höhe durch die Forsteinrichtung und aus dem Funktionswert von [1] zu dem entsprechenden Alter, der die mittlere Höhe nach der Betriebsinventur bezeichnet ( $H_{BI}$ ),

kann der Quotient gebildet werden, der angibt, in welcher Proportion  $P = H_{FE} / H_{BI}$  steht. Diese Proportionalität wird dann auf die übrigen zu schätzenden Werte übertragen

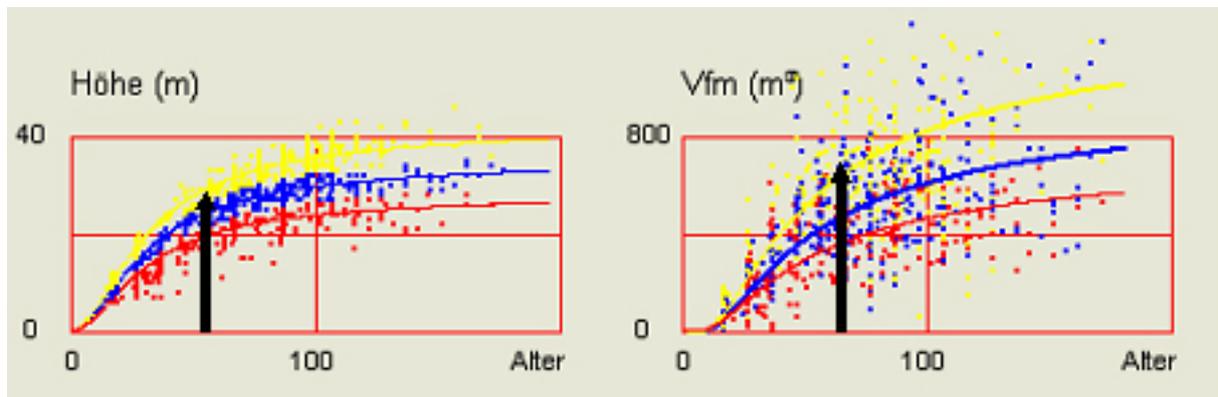


Abbildung 15: Proportion  $P = H_{FE} / H_{BI}$  bei den Höhen (Pfeil linke Seite) wird auf die Vorratsschätzung übertragen

In Abbildung 15 ist das Vorgehen zur Schätzung des aktuellen Vorrates dargestellt. Die mittlere Ausgleichsline bei den Vorräten (Abbildung 15 rechts) wird um den Faktor  $P$  gestreckt oder gestaucht. Die gelben, blauen und roten Punkte bei den Vorräten ( $V_{fm}$ ) entsprechen den Punkten bei den Höhen (Abbildung 15 links). Der Zusammenhang ist nicht mehr so deutlich, aber großen Höhen entsprechen große Vorräte und umgekehrt.

Dieses Vorgehen wurde auch bei der Formhöhe und der Schätzung des mittleren Durchmessers eines Bestandes angewandt (Abbildung 16).

Über den Vorrat dividiert durch die Formhöhe eines Bestandes ergibt sich die Bestandesgrundfläche in  $m^2$  und aus der Bestandesgrundfläche dividiert durch die Grundfläche der Durchmesserstammes (Abbildung 16 rechts) ergibt sich die Baumzahl pro ha.

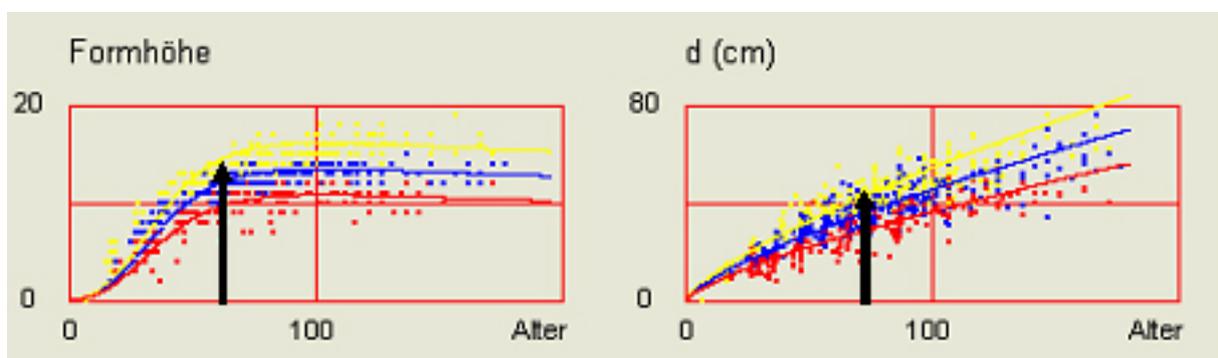


Abbildung 16: Entwicklung von Formhöhe und mittlerem Durchmesser einer Baumart

Über den mittleren Durchmesser könne aus der BI der minimale und der maximale Durchmesser abgeleitet werden (Abbildung 17).

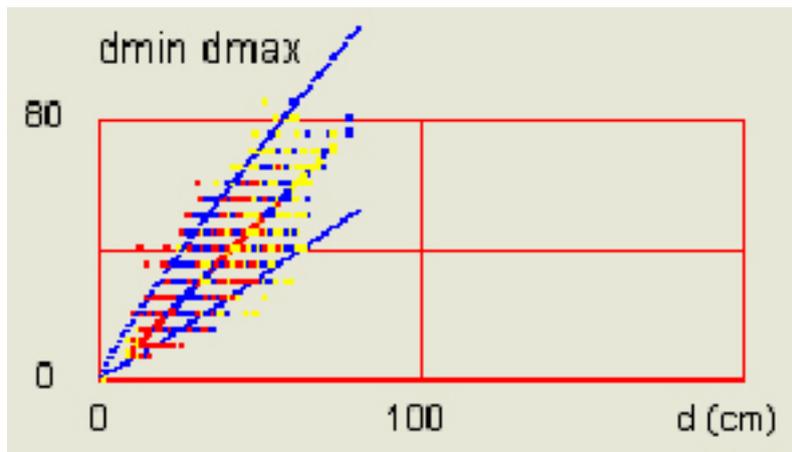


Abbildung 17: Minimaler und maximaler Durchmesser zu gegebenem mittlerem Durchmesser

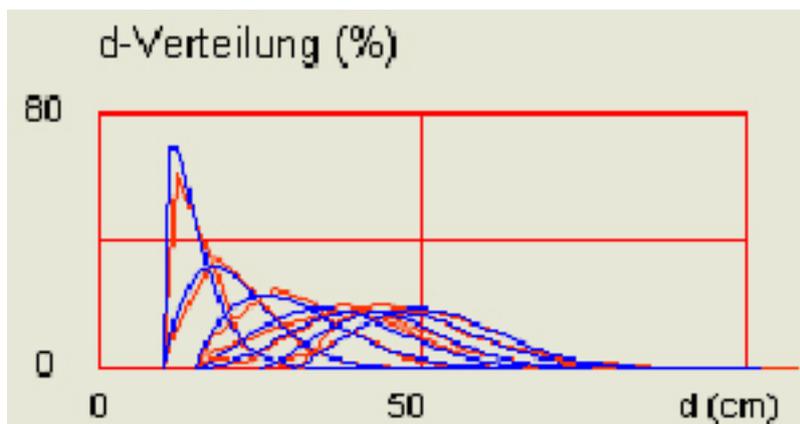


Abbildung 18: WEIBULL-Verteilung nach Alterklassen

Aus dem Alter eines Bestandes und dem minimalen Durchmesser eines Bestandes lassen sich dann die Durchmesserverteilungen aus der WEIBULL-Verteilung [6] interpolieren (Abbildung 18).

Insgesamt wurde durch dies Vorgehen ein Schätzverfahren entwickelt, welches die Okularschätzungen der Forsteinrichtung mit den präzisen Messungen der Betriebsinventur verbindet. Explizit konnte so für jeden Bestand für den Eingangsdatensatz :

- Identifikation des Bestandes (WEFLKZ)
- Baumart
- $dGz_{100}$
- Alter
- Baumartenanteil

folgender Ausgangsdatensatz berechnet werden:

- Höhe (m) und Vorrat ( $m^3$ )
- Bestandeskreisfläche ( $G$  ( $m^2$ )) und mittlerer Durchmesser ( $d$  (cm))
- Baumzahl/ha
- minimaler und maximaler Durchmesser
- Durchmesserverteilung in Quantilen

Dieser Ausgabedatensatz wurde dann in die Forsteinrichtungsdatenbank geschrieben und stand dann den weiteren Programmen zur Waldwachstumssimulation (W+) und zur Holzernte zur Verfügung. Weiterhin konnte diese Datenbanktabelle mit dem GIS-Layer der Bestandesgrundkarte über einen Link verbunden werden, so dass eine Auswahl einer bestimmten Baumart mit bestimmten verwertungstechnischen Eigenschaften sofort visualisiert werden konnte und einer weiteren Planung zu Verfügung stand.

### **2.2.3 Ableitung von Nutzungsmengen, Sorten und Aufarbeitungskosten**

#### **Nutzung I: Menge und Baumart**

Die Durchmesserverteilung des ausscheidenden Bestandes, der einzuschlagen werden soll, ist aus den abgeleiteten bestandesspezifischen Informationen für die einzelnen Waldbestände zu ermitteln.

Die detaillierten Informationen über die Nutzungsmengen und die weitere dynamische Entwicklung des Bestandes sind zu diesem Zeitpunkt noch unbekannt, da der Forsteinrichter den Hiebssatz (Efm/ha) nur global für den Gesamtbestand festlegt.

Die Kombination der bestandesspezifischen Informationen nach Kapitel 2.2.2 mit den Daten der Forsteinrichtung dienen als Eingangsdaten für den Waldwachstumssimulator W+ der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. Dieser berechnet dann die Nutzungsmenge und die weitere Entwicklung der Bestände für einen festgelegten Zeitraum (hier 10 Jahre).

Der Waldwachstumssimulator W+ ist für die Wuchsbedingungen im Südwesten Deutschlands parametrisiert. Es können Aussagen über die Entwicklung der Bestände für die Baumarten Fichte (Tanne), Douglasie und Buche (Eiche) gemacht werden. Der Wachstumssimulator basiert auf relativen Durchmesserzuwachsrate und kumulativen Durchmesser-Verteilungen, die sich auf das Bestandesalter und die Grundfläche beziehen.

Die Ergebnisse aus der Herleitung von bestandesspezifischen Informationen wurden in einer Datenbank abgespeichert. Diese Datenbank liefert den Input für den Waldwachstumssimulator W+. Dabei sind folgende Parameter notwendig:

- Bestandesnummer und Bestandesname
- Baumart
- Flächengröße
- Alter des Bestandes
- Endalter der Simulation (in MatchWood 10-jahres Zeiträume)
- Höhe oder Bonität
- Grundfläche
- Baumzahl
- Durchmesser des Grundflächenmittelstamms,  $d_{\min}$ ,  $d_{\max}$ , Quantile

Weiterhin ist die Art der Behandlung des Bestandes anzugeben, wobei die Planung der Forsteinrichtung übernommen wird, die sich an den für Baden-Württemberg festgelegten Waldentwicklungstypen orientiert.

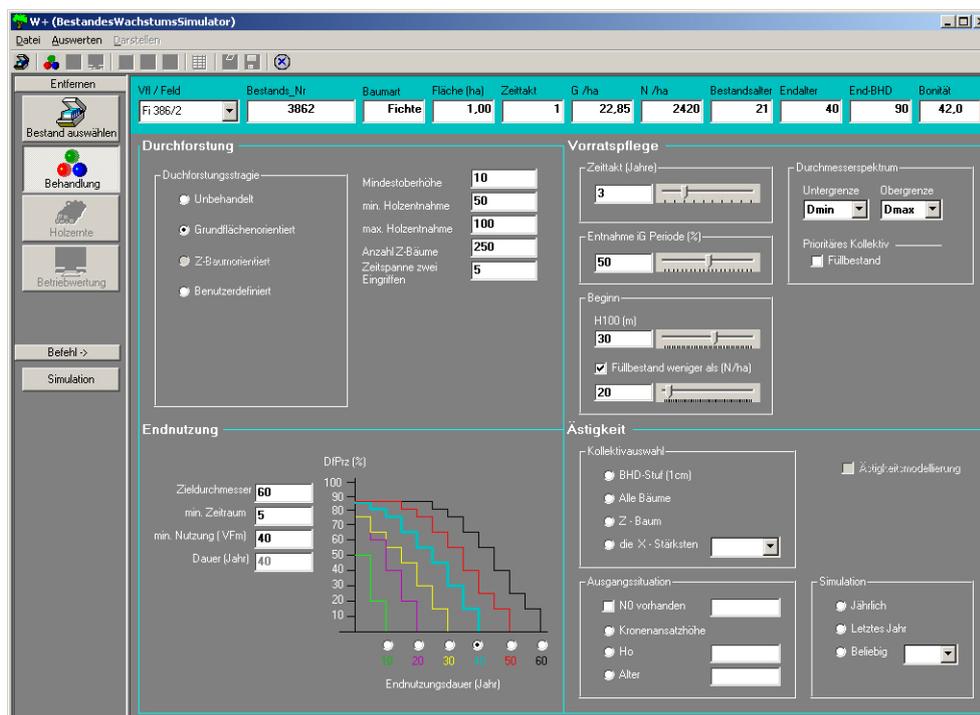


Abbildung 19: Eingabe der Behandlung von Erntebeständen in den Waldwachstumssimulator W+

Die Eingabemaske der Erntebestände ist in Abbildung 19 beispielhaft dargestellt. Entsprechend den Waldentwicklungstypen wird festgelegt, ob der Bestand in eine Auslesedurchforstung, eine Vorratspflege oder in die Endnutzung übernommen wird. Es wird

zudem festgelegt, wie hoch die Entnahmemenge, die Anzahl der Z-Bäume und die Anzahl an Eingriffen im Jahrzehnt ist.

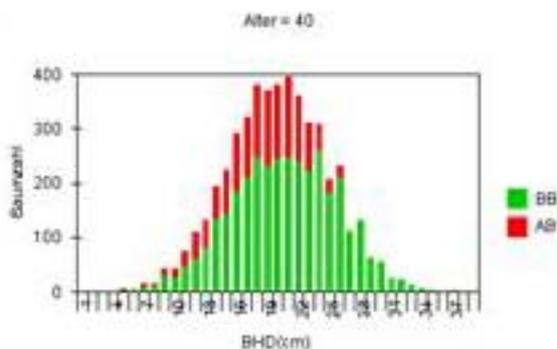


Abbildung 20: Simulation mit dem Waldwachstumssimulator W+ (das Diagramm zeigt die Durchmesser- und Höhenverteilung des verbleibenden [grün] und des ausscheidenden Bestandes [rot])

Das Ergebnis des Simulators sind Tabellen und Diagramme, in denen Informationen über die Nutzung, die Durchmesser- und Höhenverteilung wie auch das Volumen des ausscheidenden Bestandes dargestellt werden (Abbildung 20). Damit ist es möglich, für jeden Bestand zu einem beliebigen Zeitpunkt Informationen über die Durchmesser- und Höhenverteilung des ausscheidenden Bestandes zu erhalten.

Der Simulator W+ erlaubt auch die Fortschreibung der Bestandesentwicklung nach erfolgter Nutzung, so dass eine Dynamisierung bis zum Zeitpunkt der nächsten Betriebsinventur bzw. bis zu einer weiteren Nutzung gegeben ist.

Folgende Datensätze werden aus dem Waldwachstumssimulator in eine Datenbank geschrieben:

- Bestandesnummer und Bestandesname
- Baumart
- Alter im Jahr des Eingriffs
- Durchmesser im Jahr des Eingriffs
- Höhe im Jahr des Eingriffs
- Baumzahl je Durchmesser

Direkt aus dem Waldwachstumssimulator kann der nächste Arbeitsschritt aufgerufen werden. Die Daten werden direkt über die Datenbank an das nächste Modul weitergegeben.

## Nutzung II: Sortimente und Qualität

Mit Hilfe des Waldwachstumssimulators W+ wurde die Durchmesser- und Höhenverteilung des ausscheidenden Bestandes ermittelt. Für diese Nutzungsmengen muss die Sorten- und Qualitätsgliederung hergeleitet werden. Dazu kommt das Programm *Holzernte 7.1* der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg zum Einsatz.

Das Programm *Holzernte 7.1* liefert rechnergestützte Entscheidungshilfen für die Holzernte und die Holzvermarktung. Es ermöglicht eine praxisorientierte und flexible Sortierung der

Nutzungsmasse. Dabei können die Anforderungen und Wünsche der unterschiedlichen Produktlinien in der Holzindustrie (Sägewerk, Zellstoff- und Papierindustrie, Energiewirtschaft) bei der Berechnung der Sortimente entsprechend berücksichtigt werden. Zudem können die Kosten für die Holzernte, der Erlös und der erntekostenfreie Holzerlös (Deckungsbeitrag) ermittelt werden. Das Programm *Holzernte 7.1* kann also auf Sortenwahl und –aushaltung, Güteanteile, Holzpreise, Einsatzkosten, Lohnformen oder Aufarbeitsverfahren flexibel reagieren.

Das Programm *Holzernte 7.1* wird automatisch nach der Herleitung der Durchmesserverteilung des ausscheidenden Bestandes mit dem Waldwachstumssimulator W+ aufgerufen. Da die Berechnung im Holzernteprogramm 7.1 automatisch erfolgt, müssen im Vorgriff bereits Angaben über die Handhabung der Informationen des ausscheidenden Bestands vorliegen. So muss eine Zustandsbeschreibung des ausscheidenden Bestands hinsichtlich Qualität und Güte festgelegt werden. Dabei werden die Stämme bzw. Stammabschnitte prozentual in Teilkollektive in unterschiedliche Güteklassen und Längen unterteilt. Hier wird auch der Industrieholzanteil festgelegt. Weiterhin müssen die unterschiedlichen Aushaltungskriterien der Holzindustrie hinterlegt sein. Dabei kann sehr detailliert auf die Anforderungen und Wünsche zu einzelnen Produktlinien eingegangen werden. Diese holztechnologischen Parameter der Holzindustrie sind die Basis für die produktspezifische Zuordnung des ausscheidenden Bestandes. Abbildung 21 zeigt beispielhaft die Eingabemaske im Holzernteprogramm 7.1, in dem die Aushaltungskriterien der Holzindustrie angegeben werden.

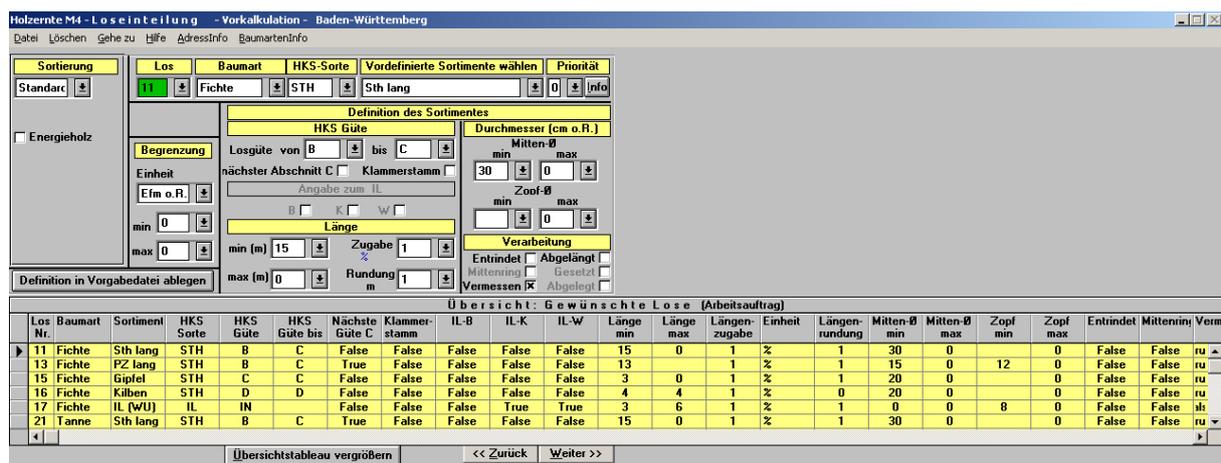


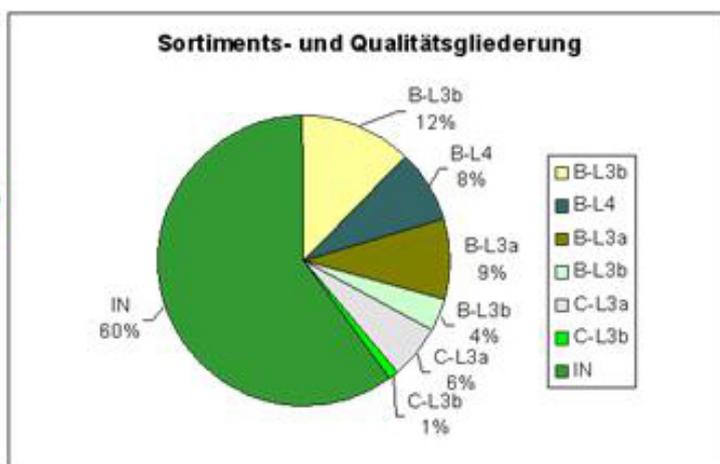
Abbildung 21: Festlegung der Aushaltungskriterien im Holzernteprogramm 7.1 der FVA Baden-Württemberg

Für eine Kostenkalkulation mit dem Programm *Holzernte 7.1* müssen die aktuellen Holzpreise für die einzelnen Sortimente und Güteklassen angegeben werden, so dass der

Erlös aus der Holzerntemaßnahme ermittelt werden kann. Außerdem sind unterschiedliche Holzernte- und Aufarbeitungsverfahren (teilmechanisiert, vollmechanisiert, Seilkran etc.) bei der Kostenkalkulation zu berücksichtigen, so dass auch entsprechend der erntekostenfreien Erlös und der Deckungsbeitrag berechnet werden kann.

Nachdem die Ergebnisse des Waldwachstumssimulators an das Programm *Holzernte 7.1* übergeben worden sind, wird die Serienberechnung mit Datenimport und Modellberechnung gestartet. Dabei wird direkt auf die Datenbank mit den gespeicherten Ergebnissen des Waldwachstumssimulators zugegriffen. Nach der Zuordnung der Nutzungsinformationen für den Erntebestand mit den gewünschten Aushaltungskriterien und Holzernte- und Aufarbeitungsverfahren, wird die Berechnung gestartet.

Das Ergebnis der Berechnung ist eine Sortiments- und Qualitätsklassifikation. Für jeden Bestand werden unter Berücksichtigung der Anforderungen der Holzindustrie Informationen über die zu erwartenden Sortimente mit den entsprechenden Güteklassen und Durchmessern als auch die Stammzahl, die Länge und das Volumen berechnet. (Abbildung 22), so dass dann anschließend eine Selektion der Bestände entsprechend der Anforderungen der Holzindustrie durchgeführt werden kann. Die zu erwartenden Sortimente mit den entsprechenden Güteklassen lassen sich graphisch oder tabellarisch darstellen.



Baumart	Sortiment	Güte	Stärkeklasse	N	Länge	Vol.
Fichte	Stammholz lang	B	L3b	120	13,8	180,6
Fichte	Stammholz lang	B	L4	78	13,6	151,0
Fichte	Stammholz kurz	B	L3a	85	5,8	39,2
Fichte	Stammholz kurz	B	L3b	34	5,8	20,2
Fichte	Stammholz kurz	C	L3a	56	5,7	25,2
Fichte	Stammholz kurz	C	L3b	11	6,0	7,1
Fichte	Industrieholz	IN	IN	578	5,1	125,3

Abbildung 22: Sortiments- und Qualitätsklassifikation im Holzernteprogramm 7.1

### Nutzung III: Verfahren, Kosten und Erlöse

Mit dem Programm *Holzernte 7.1* ist weiterhin in der Lage, eine Kostenkalkulation für alle potentiellen Erntebestände unter Berücksichtigung der verschiedenen Holzernteverfahren (teilmechanisiert, vollmechanisiert, Seilkran etc.) durchzuführen.

Das Holzernteverfahren ist abhängig von Standorts- und Geländebedingungen (Exposition, Neigung). Über das vorhandene digitale Geländemodell kann das bestgeeignete Ernteverfahren ausgewählt werden. Tabelle 5 zeigt beispielhaft die Kostenkalkulation unter Berücksichtigung der Baumarten, den Sortimenten, der Durchmesserstufen, der Stammzahl, dem Volumen, dem Ertrag sowie den Gesamtkosten und den Kosten pro Erntefestmeter.

Tabelle 5: Kostenkalkulation, erntekostenfreie Erlöse

Baumart	Nr	Sortiment	Stärke-Klasse	Anzahl	Efm o.R.	Efm m.R.	Erlös	Kosten	Kosten/Efm
Fichte	1	Sth kurz	L1a	729	56,08	64,07	1.963,00	1.222,00	21,78
Fichte	1	Sth kurz	L1a	114	8,49	9,70	297,00	186,00	21,96
Fichte	1	Sth kurz	L1b1	298	33,07	37,59	1.157,00	721,00	21,82
Fichte	1	Sth kurz	L1b1	31	3,69	4,20	129,00	81,00	22,01
Fichte	1	Sth kurz	L1b2	339	49,36	55,52	1.974,00	1.078,00	21,85
Fichte	1	Sth kurz	L1b2	13	2,06	2,31	82,00	46,00	22,10
Fichte	1	Sth kurz	L2a	108	22,44	25,28	1.122,00	491,00	21,88
Fichte	1	Sth kurz	L2a	2	0,41	0,47	16,00	9,00	22,29
Fichte	1	Sth kurz	L2b	6	1,81	2,02	91,00	40,00	21,87
Fichte	2	IL		478	18,98	21,82	512,00	420,00	22,15
				2118	196,39	222,98	7.343,00	4.294,00	21,86

Die Ergebnisse aus dem Programm *Holzernte 7.1* werden wiederum in einer Datenbank abgespeichert, so dass sie für das weitere Planungen zur Verfügung stehen.

### Warenlager Wald / Forest Warehouse

Die Nutzungsinformationen, die Sortiments- und Qualitätsgliederung und die Ergebnisse der Kostenkalkulation werden im letzten Arbeitsschritt werden den räumlichen Daten als der Bestände als Attribut angefügt.

Bisher lagen die Sortierungsergebnisse nur auf Bestandesebene vor. Über die mitgeführte ID (Bestandesnummer bzw. WEFLKZ) können die Ergebnisse an die Attributtabelle der räumlichen Daten angehängt werden. Dieser Vorgang erfolgt in dem geographischen Informationssystem ArcGIS 9.x. Mit diesem Schritt ist es nun möglich, sämtliche Sortierungsergebnisse räumlich zu visualisieren.

Die Abfrage dieser Attributtabelle selektiert und markiert alle geeigneten Erntebestände markiert, die die Anforderungen und Wünsche der Holzindustrie an das Rundholz abdecken. Abbildung 23 zeigt exemplarisch derartige Erntebestände. So sind auf der Karte alle

Bestände in hellgrün markiert, die den Anforderungen und Wünschen der Holzindustrie A (Fichte) entsprechen.

Das Ergebnis aller bisher beschriebenen Arbeitsschritte, also die Informationen und Daten über die Rundholzverfügbarkeit unterteilt nach Sortimenten, Menge, Qualität und Ort, bilden den Kern des „Warenlagers Wald“, welches eine visuelle und räumliche Zuordnung aller potentiellen Erntebestände unter Berücksichtigung der verschiedensten Anforderungen der Holzindustrie ermöglicht.

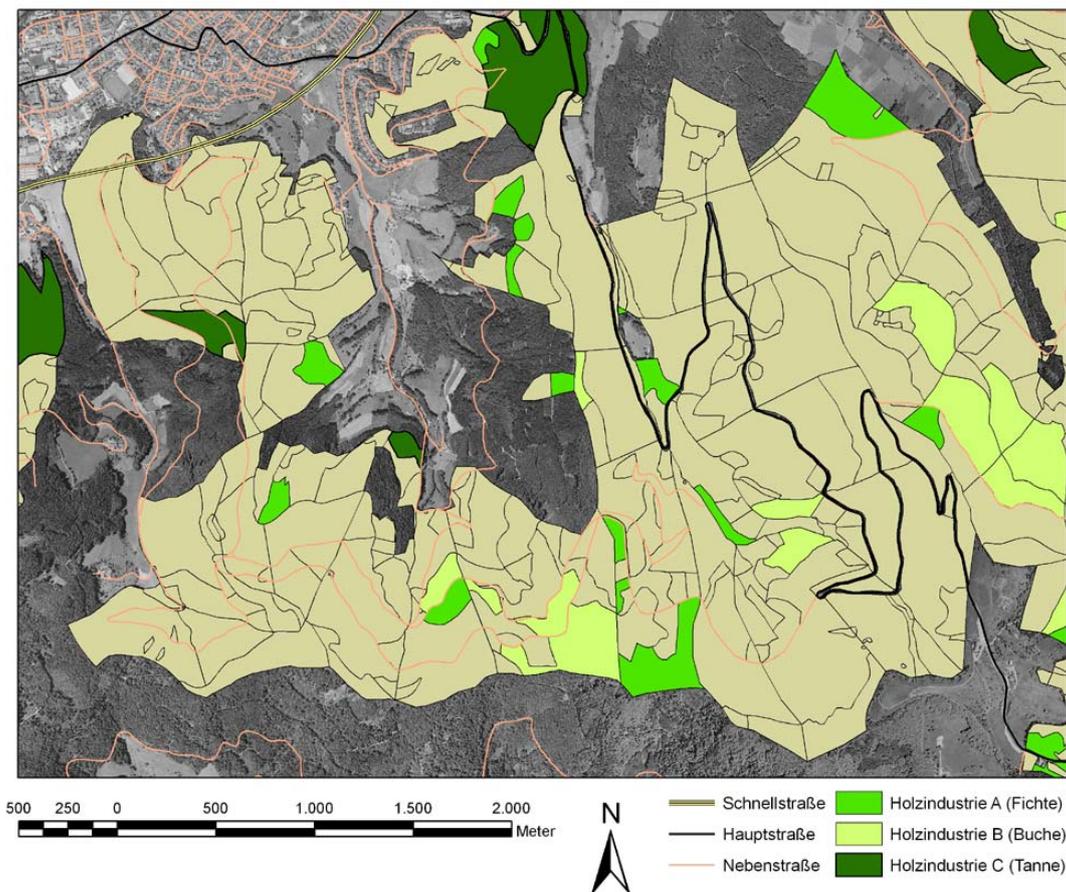


Abbildung 23: Nachfrageorientierte Bereitstellung von Rundholz, © Landesvermessungsamt Baden-Wuerttemberg, 2005

## 2.2.4 Allokation und Logistik

Nach der Herleitung der Nutzungsstrategien und der sich daraus ergebenden Nutzungsmengen und –strukturen sind eine Reihe von Beständen ausgewählt und können in einem sog. Forest Warehouse räumlich dargestellt werden. Diese Bestände entsprechen auf der einen Seite den Kundenanforderungen, auf der anderen Seite sind die Bestände

auszuwählen, die mit Blick auf die innerbetriebliche Logistik optimal sind. Optimal bedeutet hier, dass die ausgewählten Bestände räumlich nahe beieinander liegen, um die Umsetzzeiten bei der Holzernte zu minimieren und dass eine so ausgewählte Gruppe von Beständen möglichst geringe Transportentfernung zum Holzkäufer aufweist.

Dies Vorgehen folgt logistischen Grundforderungen, die sich aus dem Überbrückungsbedarf in arbeitsteilig organisierten Wirtschaftssystemen ergeben, wobei der physische Gütertransfer die elementaren Transformationsprozesse von Produktion und Konsumption miteinander verknüpft (PFOHL, 1995). Logistikprozesse beziehen sich hier auf die güterflussbezogene Raumüberbrückung, Zeitüberwindung sowie art- und mengenmäßige Zusammensetzung. Damit sind Transport- und Verkehrssysteme, Lager- und Wartesysteme sowie Umschlag- und Kommissionierungssysteme als Basiselemente der Logistik bestimmt (MERKEL, 1995).

Allokation und Raumüberbrückung ist auf eine funktionierende Infrastruktur als Mittel zum Zweck angewiesen. Die Holzernte- und Rückemaschinen fahren zwischen den Erntebeständen auf Waldwegen und der Abtransport des geernteten Holzes zum Käufer führt über Waldwege und öffentliche Strassen. Basisinstrumente der logistischen Optimierung sind hier das räumliche topologisch bereinigte Netzwerk der Strassen und Wege und darauf operierende Algorithmen zur Berechnung der kürzesten Distanzen zwischen zwei Punkten auf dem Netzwerk.

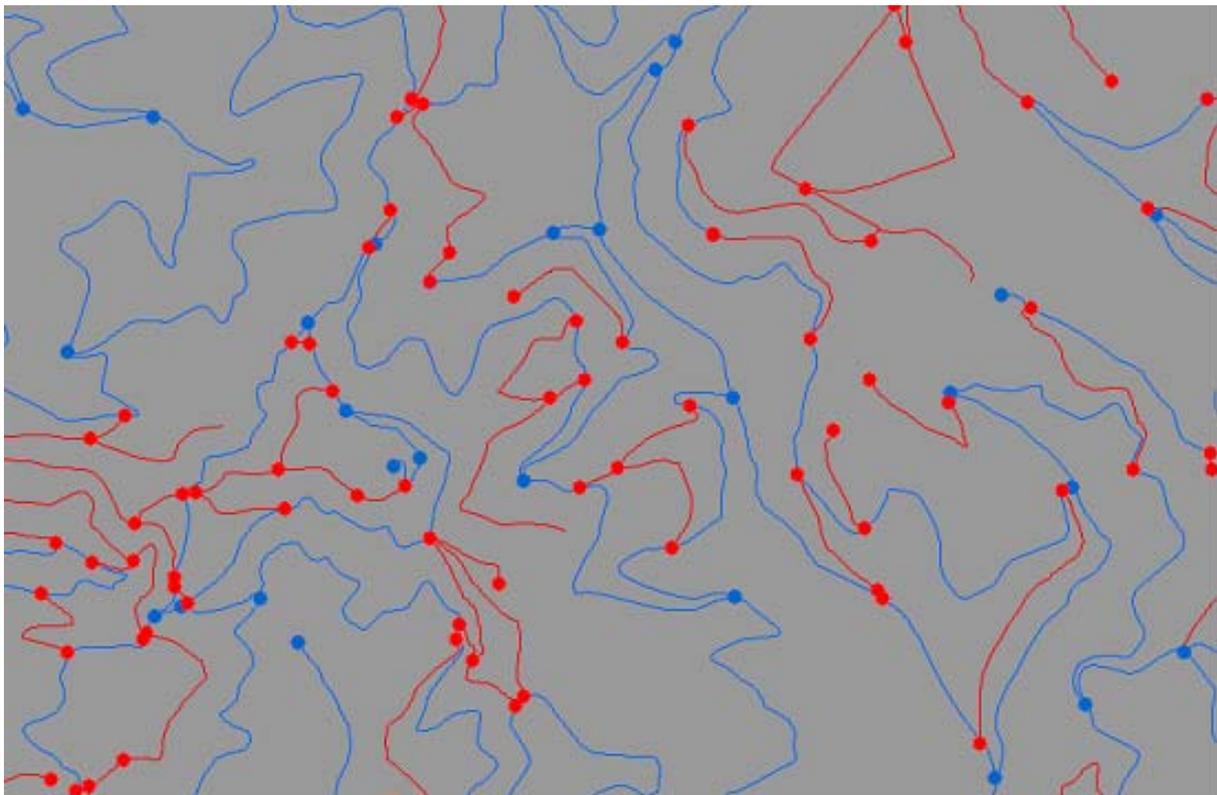
Die Allokation der Bestände erfolgt über eine speziell entwickelte Form der Clusteranalyse, die als Distanzmaß die kürzeste Entfernung auf dem räumlichen Netzwerk der Strassen und Wege verwendet. Die Bestimmung der optimalen Erntereihenfolge entspricht dem bekannten Handlungsreisenden Problem. Dieser muss eine Anzahl von Städten besuchen und möchte die Fahrtstrecke für diese Rundreise minimal halten.

Im Folgenden soll beschrieben werden, wie das räumliche Netzwerk der Strassen und Waldwege erstellt wurde, um die Basislogistik zur Berechnung kürzester Wege ausführen zu können. Danach sollen das Verfahren der Gruppenbildung und das Problem des Handlungsreisenden, wie es in MatchWood eingesetzt wurde, erläutert werden.

### **2.2.5 Routing auf räumlichen Netzwerken**

Routing auf räumlichen Netzwerken erfolgt in seiner klassischen Form über den DJIKSTRA-Algorithmus (DIJKSTRA, 1959). Das räumliche Netzwerk entspricht dabei einem gerichteten Graphen mit Kanten und Knoten. Als Maß des Widerstandes oder der Impedanz auf dem Netzwerk kann die Entfernung oder die Fahrtzeit zwischen zwei Knoten benutzt werden. Erstere ist auf Waldwegen und letztere auf dem öffentlichen Straßennetz sinnvoll. Der

DJKSTRA-Algorithmus selbst sucht von einem Startpunkt ausgehend alle Nachbarknoten, dann zu diesen Nachbarknoten alle weiteren Nachbarknoten, die noch nicht erfasst sind etc. etc. ... bis der Zielpunkt erreicht ist. Aus den akkumulierten Wegelängen resp. Wegzeiten wird dann der kürzeste Weg ausgewählt. Das Verfahren ist bei einer hohen Anzahl von Kanten und Knoten nicht sehr effektiv. Das öffentliche Straßennetz in Baden-Württemberg hat ca. 2 Mio. Kanten und für die Waldwege kommt noch mal etwa die gleiche Menge dazu. In einem solchen Fall bieten sich hierarchische Modelle an. Dabei wird das Straßennetz in einzelne Hierarchieebenen zerlegt; d.i. Autobahnen, Landstrassen 1-er, 2-er, 3-er Ordnung, innerörtliche Strassen und eben Waldwege. Der DJKSTRA-Algorithmus arbeitet hier ähnlich wie oben beschrieben mit dem Unterschied, dass die Suche nach Nachbarknoten wenn möglich auf der nächst höheren Hierarchieebene durchgeführt wird. Also aus dem Wald auf die Landstrasse 3-Ordnung ... etc etc. Gleichzeitig startet der gleiche Algorithmus vom Ziel zum Startknoten. Wenn sich die beiden Suchstrukturen treffen, wird geprüft, ob dies die kürzeste Strecke ist, ansonsten weitergesucht. Es ist offensichtlich, dass auf diese Weise die Anzahl der Knoten des Netzwerkes, welche untersucht werden muss drastisch sinkt und die Rechenzeit bei der Suche nach dem kürzesten Weg entsprechend kleiner wird. Derartige



*Abbildung 24: NAVTEQ-Daten (blau) und ATKIS-Daten (Rot). Fast alle roten Knoten mussten neu berechnet werden*

Algorithmen sind im geographischen Informationssystem ArcGIS 9.x der Fa. ESRI in dem Modul Network Analyst implementiert.

Das räumliche Netzwerk der Infrastruktur muss dazu aber topologisch korrekt; d.i. sobald eine Kante auf eine andere Kante trifft, muss ein gemeinsamer Knoten vorhanden sein. Das öffentliche Straßennetz lag für MatchWood als NAVTEQ-Datensatz vor und die Waldwege mussten aus ATKIS herausselektiert werden (Abbildung 24). Teilweise waren die Waldwege auch nach dem neuen GEODAT-Standard klassifiziert.

- NAVTEQ ( bis Februar 2004: Navigation Technologies (Navtech)) ist ein börsennotierter US-amerikanischer Anbieter von [Geodaten](#) zum Einsatz in [Navigationsgeräten](#).
- Das Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem (ATKIS) wird seit 1990 zum Zwecke der digitalen Führung der Ergebnisse der topographischen Landesaufnahme und der amtlichen topographischen Karten auf Empfehlung der Arbeitsgemeinschaft der Vermessungsverwaltungen der Länder der Bundesrepublik Deutschland (AdV) von den Landesvermessungsämtern und dem Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG) aufgebaut.
- GEODAT: Der Deutsche Forstwirtschaftsrat (DFWR) und der Deutsche Holzwirtschaftsrat (DHWR) haben in ihrer gemeinsamen Präsidiumssitzung am 12.11.2002 in Kulmbach beschlossen, bundeseinheitliche Standards für geographische Daten zu erarbeiten, um die Holzlogistik weiter zu optimieren. In einem ersten Projekt sollen die Voraussetzungen geschaffen werden, um den Fahrern der Rundholz-LKW das Auffinden des im Wald lagernden Holzes per Navigationssystem auf dem kürzesten Weg zu ermöglichen.

Nachdem die topologische Korrektheit der Daten hergestellt war, konnte im GIS eine hierarchische Datenbank mit den oben geschilderten Hierarchieebenen aufgebaut werden.

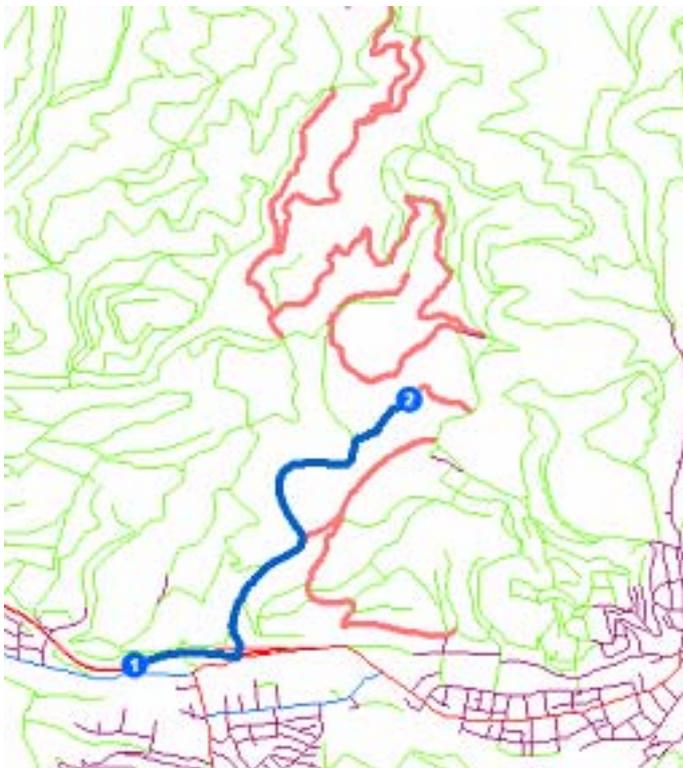


Abbildung 25: Routing von einem Holzpolter im Wald (2) zu einem Ziel (1) auf dem öffentliche Straßennetz

Auf diese Datenbank konnte dann der Solver des Network Analyst zugreifen, um kürzeste Wege zu berechnen. Abbildung 25 zeigt in Grün die Waldwege, in Rot nach GEODAT

klassifizierte Waldwege und in Blau den kürzesten Weg von einem Holzpolter (2) zu einem Ziel (1) auf dem öffentlichen Straßennetz.

### 2.2.6 Gruppenbildung

Zur Beantwortung einer Kundenanfrage sollen die Bestände ausgewählt werden, die die gewünschten Holzprodukte beinhalten, erntebereit und von ihrer räumlichen Lage bezüglich der Erntebedingungen und dem anschließenden Transport her optimal sind. Optimal heißt hier, dass die Bestände mit Bezug auf die vorhandenen Waldwege oder die forstliche Infrastruktur so möglichst nahe zusammen liegen und eine geringe Transportentfernung zum Kunden aufweisen.

Die ausgewählten Bestände sind in einer Liste zusammengestellt und können im GIS visualisiert werden. Das operative Management bildet aus dieser Liste Gruppen benachbarter Bestände, um die Holzernte logistisch zu optimieren. Die Gruppenbildung selbst fußt weniger auf systematischen Gründen, sondern eher auf lokalen Erfahrungen. Das Management handelt dabei intuitiv, schätzt die Gruppen über die direkten, euklidischen Distanzen und erzielt gute Ergebnisse in einfachem Gelände. Hinsichtlich der gewünschten Menge des Kunden sind mehrere Situationen denkbar. Erstens das Warenlager Wald kann den Kundenwunsch nur unvollständig decken, zweitens kann der Kundenwunsch zu  $\pm 10\%$  erfüllt werden und drittens die vorhandene Menge übersteigt den Kundenwunsch deutlich.

Im ersten Fall ist sicher nochmals mit dem Kunden zu verhandeln, im zweiten Fall kann der Forstbetrieb ein Angebot machen oder auch nicht, vielleicht ergibt sich ja keine ausreichende Kostendeckung und im dritten Fall ist die optimale Fraktion der Bestände nach räumlichen Gesichtspunkten auszuwählen. Insgesamt sind nur Fall 2 und 3 relevant, für die operationale Planung Fall 2 ein Teilproblem von Fall 3 darstellt. Sowohl in Fall 2 und 3 sind für die operationale Ernte Gruppen zu bilden und für das Umsetzen der Maschinen innerhalb einer Gruppe und zwischen den Gruppen von Erntebeständen die optimale Erntereihenfolge mit dem kürzesten Weg zu bestimmen.

Die Gruppenbildung selbst kann in bergigem Gelände nicht über euklidische Distanzen (Luftlinie) erfolgen, sondern muss topographische Hindernisse wie Flüsse oder Steilhänge einbeziehen. Die tatsächliche Distanz zwischen zwei Beständen entspricht hier den Umwegen um das Hindernis. Die Frage lautet: welcher Algorithmus führt bei beliebiger Topographie zu geeigneten Gruppen von Erntebeständen?

## Clusteranalyse als theoretische Grundlage

Die Bildung geeigneter Gruppen besitzt viele Parallelen zur Clusteranalyse. Jede Clusteranalyse teilt eine Menge von Objekten in Gruppen hoher Ähnlichkeit. „Ähnlichkeit“ bedeutet im Fall der Gruppen „räumlich nahe zusammen liegend“. Jeder Bestand einer Gruppe liegt dann näher zu Beständen der eigenen Gruppen als zu den übrigen Gruppen.

Eine reelle Funktion definiert dazu „Ähnlichkeit“ für die Zufallsvariable  $X = \{x_1 \dots x_n\}$ , indem sie zwei Elementen aus  $X$  den Wert  $d = d(x_i, x_j)$  oder kürzer  $d_{ij}$  zuordnet. Dies entspricht der Distanz zweier Elemente aus  $X$ . Anschaulich bedeutet eine größere Ähnlichkeit eine kleinere Distanz.

Distanzfunktionen gibt es für nominale, ordinale und metrische Variable. Hier interessieren nur metrische Variable mit Rücksicht auf die Gruppen. Die Elemente  $x_i, x_j$  aus  $X$  sind für metrische Variablen Koordinaten in der Schreibweise:

$$\mathbf{x}'_i = (x_{i1} \dots x_{in})$$

$$\mathbf{x}'_j = (x_{j1} \dots x_{jn})$$

und repräsentieren Punkte eines  $n$ -dimensionalen Zahlenraumes. Diese Koordinaten haben das allgemeine Distanzmaß:

$$d_{ij} = [(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)'(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)]^{1/r} = \left[ \sum_{l=1}^n |x_{il} - x_{jl}|^r \right]^{1/r} \quad [1]$$

Die letzte Gleichung beschreibt im Fall  $r = 2$  die euklidische Distanz und im Fall  $r = 1$  die „City-block“- , „Taxifahrer“- oder „Manhattan“-Distanz. Die letzte Distanz ist anschaulich die Summe der Katheten eines rechtwinkligen Dreiecks, während die Hypotenuse die euklidische Distanz beschreibt.

Die Distanzfunktion [1] ist für die Gruppen von Erntebeständen nicht anwendbar, da die Erntemaschinen oder LKW nur auf den vorhandenen Wegen fahren. Die Manhattan-Distanz ist ungeeignet, da Waldwege fast nie im rechten Winkel liegen, und die euklidische Distanz verkürzt die Realität, da Tieflader nicht durch Flüsse schwimmen können. Die Funktion muss für eine Gruppen die Distanz abbilden, die entlang der Wege die kürzeste Entfernung zwischen zwei Erntebeständen beschreibt. Eine derartige Distanzfunktion ist präziser ausgedrückt ein Algorithmus, der auf dem Netzwerk der Wege die kürzeste Distanz zwischen zwei Punkten ermittelt. Dazu wurde der im vorigen Kapitel beschriebene der Fa. ESRI verwendet zusammen mit dem hierarchischen System der Infrastruktur bestehend aus öffentlichen Strassen und Waldwegen.

Der Network-Analyst benötigt als Start und Ziel Punkte auf dem Wegenetz, welche die Erntebestände repräsentieren. Diese Punkte kann man entweder manuell setzen oder automatisiert berechnen. Letzteres indem man etwa eine Stelle auf dem Wegenetz sucht, die den kürzesten Abstand zum Schwerpunkt des Bestandespolygons hat. Dieser Punkt besitzt dann in jedem Fall dieselbe Identifikation wie der Bestand. Alle Nutzungsbestände erhalten in dieser Form einen Punkt als Repräsentanten auf dem Wegenetz. Besitzen alle Bestände sie repräsentierende Punkte auf dem Wegenetz, können die Abstände zwischen allen Erntebeständen berechnet werden.

Die Clusteranalyse stellt es prinzipiell frei, welche Distanzfunktion verwendet wird. Hier ist aus praktischen Erwägungen der kürzeste Weg auf dem Wegenetz zwischen zwei Erntebeständen  $i$  und  $j$  von Bedeutung und dieses Distanzmaß soll im Folgenden  $dd_{ij}$  heißen für DIJKSTRA-Distanz.

Die Clusteranalyse benötigt für die Gruppenbildung die Distanzmatrix  $D = (dd_{ij})$ , die alle Distanzen zwischen allen Beständen enthält.  $D$  ist symmetrisch, da für den kürzesten Abstand zwischen zwei Beständen  $i$  und  $j$   $d_{ij} = d_{ji}$  gilt. Da die Diagonalelemente der Matrix  $D$  alle den Wert 0 haben, sind für  $n$  Erntebestände  $n(n-1)/2$  Distanzen auf dem Wegenetz zu berechnen.

Für den vorliegenden Fall der Gruppenbildung von Erntebeständen erweist sich von den verschiedenen clusteranalytischen Verfahren als geeignete Prozedur (STEINHAUSEN u. LANGER, 1977). Single-Linkage ist ein hierarchisches Verfahren und agglomerativ; d.h. es geht von der feinsten Partition der vorhandenen Objekte aus und fügt schrittweise einzelne Objekte zu Clustern zusammen.

Single-Linkage hat einen weiteren Vorteil. Man kann das Wegenetz als einen ungerichteten Graphen auffassen, dessen Knoten die Punkte sind, die die Bestände repräsentieren. Es genügt daher, den sog. minimalen Spannbaum (KRUSKAL, 1956) zu berechnen. Ein Minimaler Spannbaum verbindet eine Punktmenge auf der Ebene, wobei die Summe der Kantenlängen minimal ist. Er stellt das Analogon zu einem Dendrogramm der Clusteranalyse dar, welches ein Binärbaum ist. Aufgrund dieser Eigenschaft kann man den Baum beliebig teilen, wobei immer wieder Binärbäume entstehen. Diese Teilbäume sind die Cluster resp. Gruppen. Das Problem ist damit reduziert auf die Berechnung eines minimalen Spannbaumes.

Für euklidische Distanzen ist der minimale Spannbaum eine Teilmenge eines berechneten Triangulationsnetzes. Dies hat rechnerische Vorteile, da nicht mehr die gesamte

Distanzmatrix zu berechnen ist. Bei einer Triangulation von  $n$  Punkten liegt die Obergrenze der zu berechnenden Distanzen bei  $2n - 2$ , wenn alle Punkte im Degenerationsfall um einen Mittelpunkt herum auf einem Kreis liegen. Bei 2000 Punkten sind im Idealfall nur etwa 4000 statt  $2000 \cdot 1999/2$  Distanzen zu berechnen.

Die Distanz  $d_d$  zwischen zwei Beständen ist dann nicht mehr Bestandteil des minimalen Spannbaumes, wenn ein weiterer Bestandespunkt auf dem Weg liegt. Die berechnete Gesamtdistanz zerfällt für die drei beteiligten Bestände in zwei Einzeldistanzen, die die Matrix  $D$  aufnimmt. Eine modifizierte Suche nach SEDGEWICK (1988, S. 458 ff.) erlaubte es, die nächsten Nachbarn zu einem Zentralbestand relativ leicht zu finden. Dabei wurden durchschnittlich 6 Distanzen berechnet. Das Verfahren verhält sich annähernd linear mit dem Faktor  $O(6n)$ .

### Anwendungsbeispiel

Angenommen ein Kunde wünscht rund  $2200 \text{ m}^3$  Fichtenholz (Abschnitte à 4m), dann können über eine Datenbankabfrage die Bestände direkt lokalisiert werden (Abbildung 26).

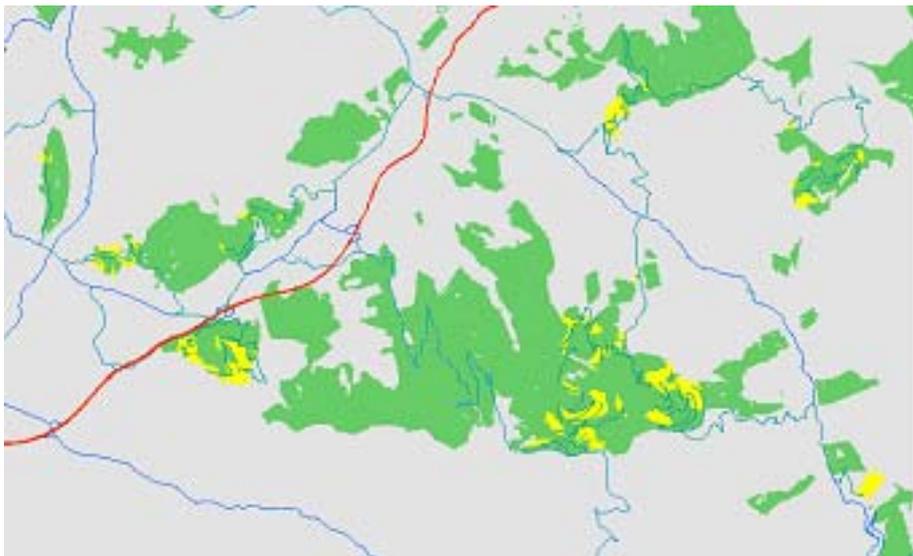


Abbildung 26: Lokalisierung von Beständen (gelb), die einer Kundenanfrage entsprechen. Wald grün

Ausgangspunkt für die Berechnungen sind die Erntebestände und das Wegenetz (Abbildung 27)

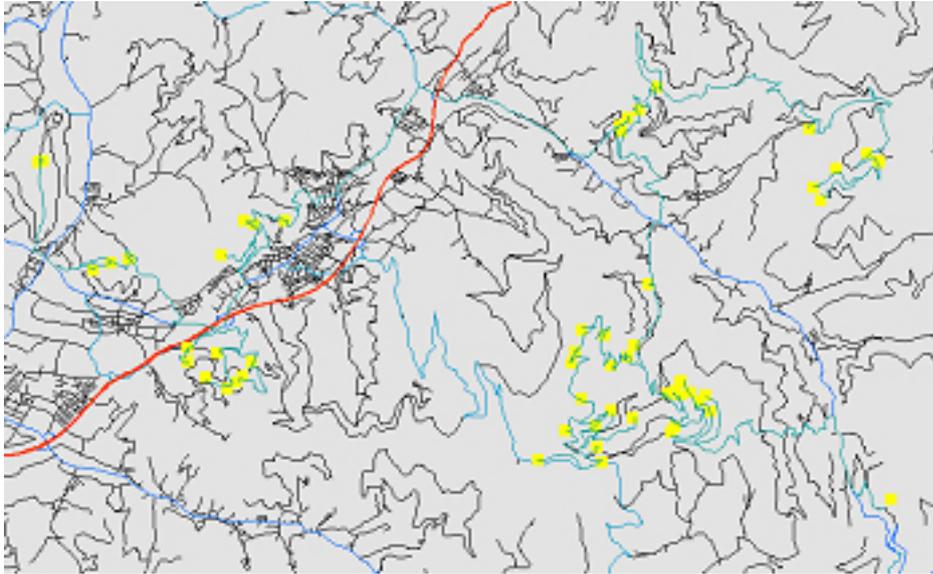


Abbildung 27: Erntebestände und Wegenetz ohne Darstellung des Waldes

Das Programm berechnet zunächst für jeden Erntebestand den Punkt, der auf dem Wegenetz liegt und den Bestand repräsentiert. Danach werden die Distanzen zwischen allen Beständen berechnet und anstatt in einer Distanzmatrix als Linienlayer gespeichert (Abbildung 28)

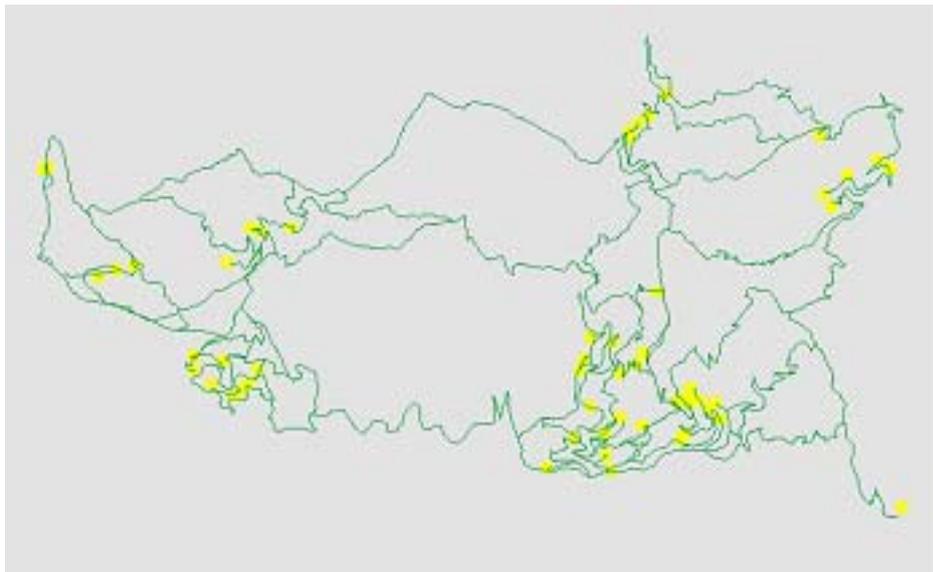


Abbildung 28: Punkte auf dem Wegenetz (gelb), die die Bestände repräsentieren und die Distanzen zwischen den Beständen (grün) als Linienlayer

Von dem Linienlayer wird nach dem Algorithmus von KRUSKAL (1956) der minimale Spannbaum berechnet; d.i. ein binärer Baum der alle Bestandespunkte verbindet und dessen Länge minimal ist (Abbildung 29).

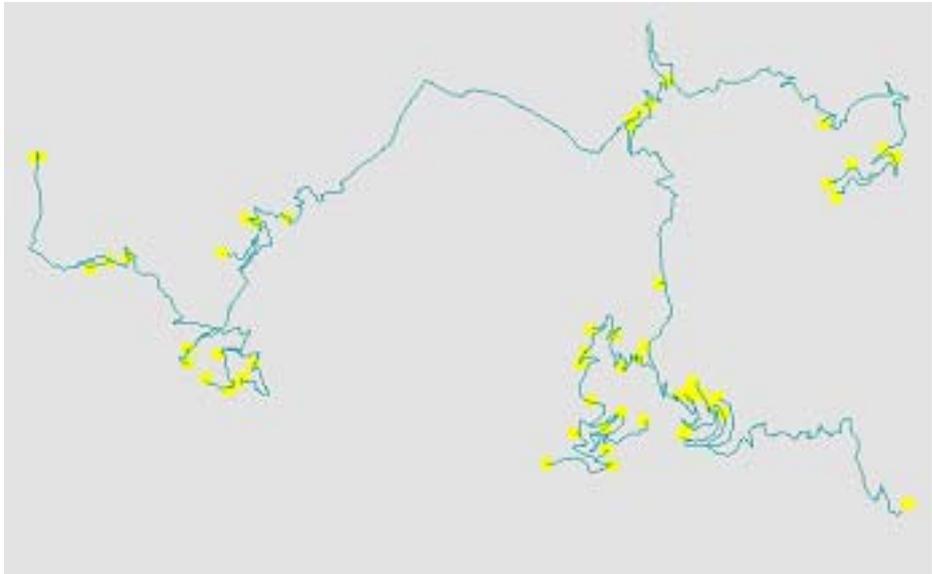


Abbildung 29: Punkte auf dem Wegenetz (gelb) und minimaler Spannbaum

Der minimale Spannbaum kann an der längsten Distanz geteilt werden und zerfällt damit automatisch in zwei Gruppen. Innerhalb dieser Gruppen kann weiter an den längsten Distanzen geteilt werden. Usf., solange der Vorrat reicht. Aus erntetechnischen dürfen die

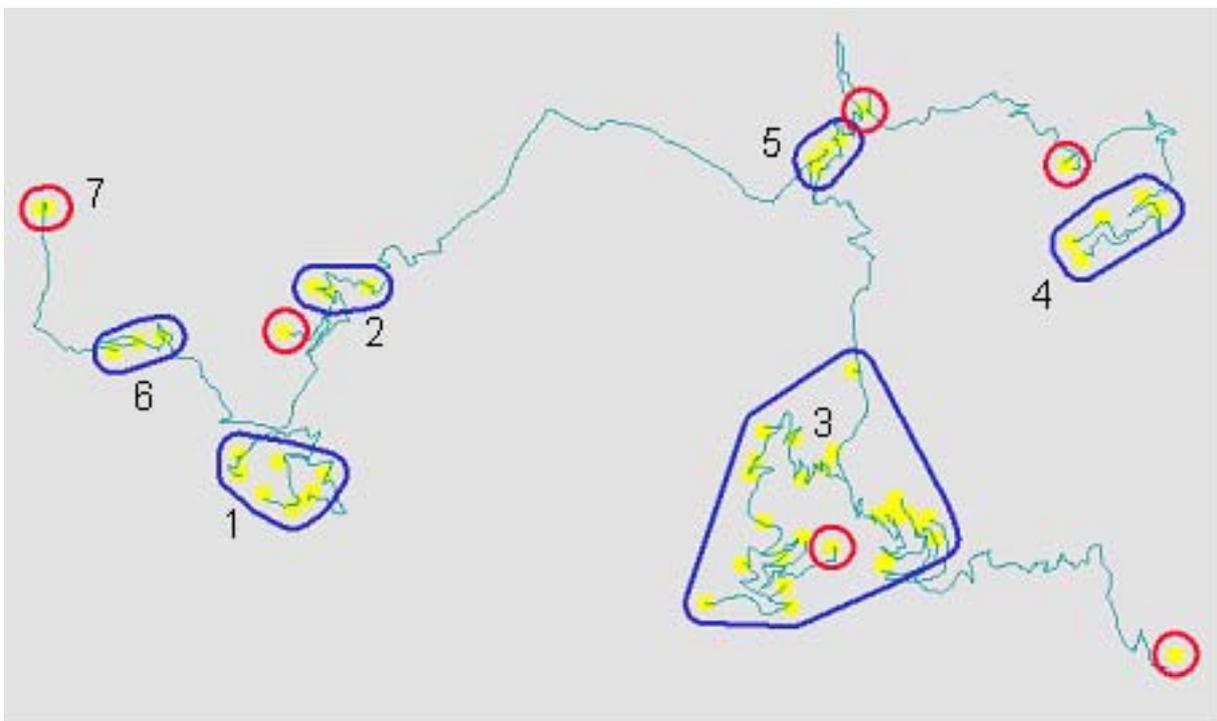


Abbildung 30: Gruppen von Erntebeständen. Rot umrandet Einzelbestände, blau umrandet sonst

Bestände eine gewisse Solldistanz von vielleicht 3 km nicht überschreiten. Entfernt man alle derartigen Kanten aus dem minimalen Spannbaum, ergeben sie die Gruppen (Abbildung 30).

In Gruppe 3 fällt ein rot umrandeter Bestand auf, der nicht zu Gruppe 3 gehört. Seine Distanz zum nächsten Bestand innerhalb von Gruppe 3 ist serpentinbedingt über 3 km.

Die Auswahl der optimalen Gruppe ist an dem Kundenwunsch zu orientieren, der im vorliegenden Beispiel 2.200 m<sup>3</sup> benötigt. In Tabelle 6 sind die Vorräte der einzelnen Gruppen mit mehr als einem Erntebestand zusammengestellt.

Tabelle 6: Vorräte innerhalb der Gruppen

Gruppe	m <sup>3</sup>
1	742
2	64
3	5573
4	426
5	705
6	488
7	460

Gruppe 3 hat wesentlich mehr Holzmenge, als der Kunde wünscht, hingegen müssten die anderen Gruppen kombiniert werden. Gruppe 3 wurde daher in zwei Teilgruppen geteilt und die die Gruppen 1, 2, 4, 6 und 7 zu einer Einheit zusammengefasst. Neben der Menge sind in die Überlegungen auch noch die Erlöse abzüglich der Holzerntekosten, wie sie durch das Programm „Holzernte“ berechnet wurden in die Überlegungen einzubeziehen. In Tabelle 7 sind die Gruppen und die holzerntekostenfreien Erlöse zusammengestellt.

Die neu gebildete Teilgruppe 3a liegt mit fast 47.000 € etwa 3.000 € über dem Erlös der blauen Kombinationsgruppe, wobei hier noch die Umsetzkosten der Maschinen zwischen den Gruppen hinzukommen. Hinsichtlich der Erlöse ist also die Gruppe 3a vorzuziehen.

Tabelle 7: Vorräte und erntekostenfreier Erlös

Gruppe	m <sup>3</sup>	€/m <sup>3</sup>	€
1	742	18	13356
2	64	47	3008
<b>3a</b>	<b>2234</b>	<b>21</b>	<b>46914</b>
3b	3339	19	63441
4	426	22	9372
5	705	16	11280
6	488	17	8296
7	460	21	9660
<b>(1,2,4,6,7)</b>	<b>2180</b>	<b>20</b>	<b>43692</b>

### 2.2.7 Optimale Erntereihenfolge

Die Frage nach der optimalen Erntereihenfolge der Bestände entspricht dem Problem des Handlungsreisenden, der eine Rundtour durch Städte machen will und den kürzesten Weg sucht, der durch alle Städte führt. Dabei kann man den Startpunkt gleich dem Zielpunkt setzen oder auf diese Bedingung verzichten. Für  $n$  Bestände gibt es die Indexmenge  $I = \{1 \dots n\}$  und  $d(i, i+1)$  die Entfernung zwischen zwei Beständen auf dieser Indexmenge. Das Handlungsreisenden-Problem muss aus der Permutationsmenge der Indexmenge  $I$  die Permutation  $I_{\text{opt}}$  finden, bei der Summe der Distanzen zwischen den Beständen minimal ist. Für das Problem gibt es keine direkte Lösung. Das Problem heißt NP-hart; d.i. der Rechenaufwand steigt überexponentiell, wenn man alle Kombinationen untersucht.

Für den hiesigen Zweck wurde der Algorithmus, den der Network-Analyst anbietet verwendet. Für die Gruppe 3 a wurde der kürzeste Weg aus der Erfahrung heraus (Abbildung 31, links) und mit Hilfe der Heuristik (Abbildung 31, rechts) berechnet. Die Heuristik liegt mit 11 km Länge deutlich unter der Erfahrungslösung mit 20 km Länge.

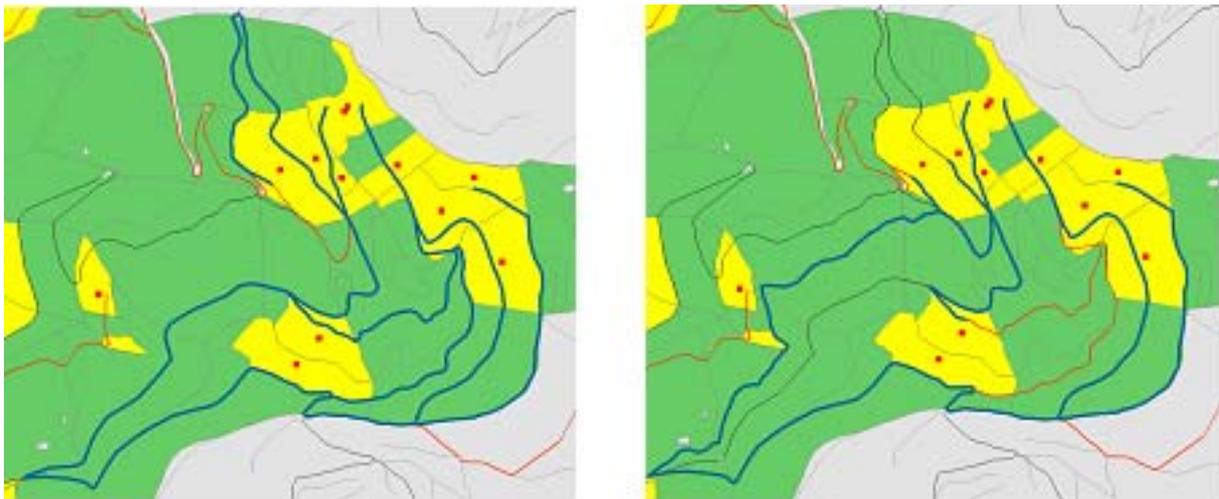


Abbildung 31: Erntereihenfolge aus Erfahrung 20 km (links) und über ein Heuristik 11 km (rechts)

### 2.2.8 Fazit

Das während der Projektlaufzeit entwickelte, halbautomatisierte Modell ist die Grundlage für eine nachfrageorientierte Zuordnung von Rundholz unter Berücksichtigung der Anforderungen der Holzindustrie.

Das Konzept des „Warenlager Wald“ erlaubt eine räumliche Abschätzung der nachhaltigen Nutzungsmenge mit der korrespondierenden Sortengliederung und Qualität. Durch das Eingehen auf die spezifischen Anforderungen der Holzindustrie an das Rundholz, kann die Effizienz deutlich gesteigert werden. Dies führt zu höherer Kundenzufriedenheit, niedrigeren

Bereitstellungs- und Prozesskosten und letztlich zu einer Erhöhung des Reinerlöses. Qualitätsmängel, Ausschussware, umfangreiche Vorgänge des Nachsortierens sowie Betriebsstörungen können reduziert und minimiert werden.

Weiter werden die Ernte- und Transportkosten reduziert und die Effizienz der Beschaffung auf Seiten der Holzindustrie gesteigert, beides resultiert in einer höheren Wertschöpfung.

Weitere Verbesserungen in der Wertschöpfungskette ermöglichen die Nutzung durch Blockbildung, das Poltermanagement und die Navigation im und außerhalb des Waldes.

### **2.3 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans**

Bislang sind keine vergleichbaren Ansätze zur nutzungsorientierten Erfassung von Holzressourcen und zur Abstimmung der Holznutzung auf Produktlinien bekannt. Unabhängig von einer direkten Verwertbarkeit der Ergebnisse wurde der forstlichen Praxis aller Eigentumsformen deutlich gemacht, welchen Wert eine ereignisgesteuerte und prozessorientierte Forst-Holz-Kette besitzt und welchen Wert der Einsatz moderner Informations- und Kommunikationstechnik darstellt. Die Forstbetriebe konnten durch den modularen Aufbau des Projektes MatchWood diejenigen Teile auswählen, die innerhalb der eigenen Prozessabläufe zu direkte Verbesserungen führen würden.

Dementsprechend sind die in diesem Teilprojekt erzielten Ergebnisse als sehr hoch einzustufen. Die Einbeziehung der Projektpartner aus der Praxis auf allen Ebenen (Waldbesitzer, forstliche Dienstleistungsunternehmen, Holzindustrie) gewährleistete, dass die Verfahren aus den Forschungsarbeiten praxisnah entwickelt wurden und die praktischen Belange in der Forst- und Holzwirtschaft entsprechend berücksichtigt wurden.

Die entwickelten Konzepte und Modelle stehen einem breiten Anwenderkreis frei zur Verfügung. Anwendungsnahe Lösungen und Instrumente, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurden, sind über die Beteiligung der Projektpartner, aber auch (über das Anwender- und Stakeholder-Panel) für eine breite interessierte Fachöffentlichkeit erreichbar.

### **2.4 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen**

Das Teilprojekt 2: Forest Warehouse beschäftigt sich mit unterschiedlichen Aspekten in der Holzbereitstellungskette. Es werden u.a. Fragestellungen aus den Bereichen Waldbau,

Nutzung und Logistik berührt. Die Entwicklung einer nachfrageorientierten Bereitstellung von Rundholz an die Holzindustrie setzt auf Softwaremodulen aus den genannten Bereichen auf. Diese Softwaremodule werden fortlaufend weiterentwickelt. Während der Bearbeitung des Teilprojekts wurden die neu- und weiterentwickelten Tools berücksichtigt und entsprechend in das Verfahren eingebaut.

## 2.5 Erfolge und geplante Veröffentlichungen

### Artikel, Proceedings:

- BECKER, B., SMALTSCHINSKI, TH., KLÄDTKE, J., BECKER, G. (2009): MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Kundenspezifische Zuordnung von Erntebeständen und Sortimenten. *AFZ / Der Wald* No. 2, S. 62 - 64
- BECKER, B., KLÄDTKE, J. (2008): MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Zuordnung von Erntebeständen unter Berücksichtigung von Ernteplanung und kunden-spezifischen Anforderungen. *Freiburger Forstliche Forschung*, 2008 (76): 53 (Forstwissenschaftlichen Tagung 2008: Ressourcenknappheit und Klimaänderung: Herausforderungen für die Forstwissenschaft, 24.09.2008 - 27.09.2008, Freiburg), Spiecker, Heinrich; von Teuffel, Konstantin (Hrsg.)
- BECKER, B., KLÄDTKE, J. (2008): MatchWood – From Trees to Products: Allocation of Stands in the context of Harvesting Planning and user-specific Requirements. *Proceedings IUFRO ALL-D3-Conference* (IUFRO ALL-D3-Conference - Pathways to Environmentally Sound Technologies for Natural Resource Use, 15.06.2008- 20.06.2008, Sapporo, Japan)
- BECKER, B., KLÄDTKE, J., BECKER, G. (2008): MatchWood – From Trees to Products: Product-specific Allocation of Raw Material to the Wood Industry. *Proceedings FORMEC 08* (FORMEC '08, 02.06.2008 - 05.06.2008, Schmallenberg), Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (Hrsg.)

### Vorträge:

- SMALTSCHINSKI, TH., BECKER, G. (2009): Logistik beim Rundholztransport - Rückfracht und Transportproblem. Vortrag im Rahmen der 15. Deutschsprachige ESRI Anwenderkonferenz vom 05. Mai 2009 bis 07. Mai 2009 in Bregenz, Österreich
- SMALTSCHINSKI, TH., BECKER, B., BECKER, G. (2009): Precision Forestry und forstliche Wertschöpfungskette. Vortrag im Rahmen der 29<sup>th</sup> GIL-Konferenz am 09. und 10. März 2009 in Rostock
- BECKER, B., SMALTSCHINSKI, TH. (2008): MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Bedarfsgerechte Bereitstellung von Rundholz. Vortrag im Rahmen der Abschlussstagung des BMBF-Verbundprojektes "MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung" am 08. und 09. Dezember 2008 in Freiburg

- SMALTSCHINSKI, TH., BECKER, G. (2008): Optimization of back freight transportation systems. Vortrag im Rahmen der FAO/ECE-Konferenz "International Seminar on Infrastructure and Transport in Sustainably Managed Forests" vom 21. Oktober 2008 bis 26. Oktober 2008 in Portoroz, Slowenien
- BECKER, B.; KLÄDTKE, J. (2008): MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Zuordnung von Erntebeständen unter Berücksichtigung von Ernteplanung und kunden-spezifischen Anforderungen. Vortrag im Rahmen der Forstwissenschaftlichen Tagung 2008: Ressourcenknappheit und Klimaänderung: Herausforderungen für die Forstwissenschaft vom 24.09.2008 - 27.09.2008 in Freiburg
- BECKER, B.; KLÄDTKE, J. (2008): MatchWood - From Trees to Products: Allocation of Stands in the Context of Harvesting Planning and user-specific Requirements. Vortrag im Rahmen der IUFRO ALL-D3 Konferenz vom 15.06.2008 - 20.06.2008 in Sapporo, Japan
- SMALTSCHINSKI, TH. (2008): Frachtenoptimierung beim Rundholztransport durch Rückfracht. Vortrag im Rahmen der 15. KWF-Tagung vom 04. Juni 2008 bis 07. Juni 2008 in Schmallingenberg
- BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2008): MatchWood - From Trees to Products: Product-specific Allocation of Raw Material to the Wood Industry. Vortrag im Rahmen der Postervorstellung auf der FORMEC 2008 vom 02.06.2008 - 05.06.2008 in Schmallingenberg
- BECKER, B., SMALTSCHINSKI, TH. (2008): MatchWood - Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik - Bedarfsgerechte Bereitstellung von Rundholz. Vortrag im Rahmen eines Bearbeitertreffens des BMBF-Verbundprojektes "MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung" am 07.04.2008 in Freiburg
- BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2007): MatchWood - From Trees to Products: Product-specific Allocation of Round Wood to the Timber Industry. Vortrag im Rahmen der 3rd Forest Engineering Conference vom 01.10.2007 - 04.10.2007 in Mont Tremblant, Kanada
- BECKER, B.; SMALTSCHINSKI, TH. (2007): MatchWood - Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik - Bedarfsgerechte Bereitstellung von Rundholz. Vortrag im Rahmen des III. Statuskolloquiums des BMBF-Verbundprojektes "MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung" am 18.09.2007 in Freiburg
- SMALTSCHINSKI, TH. (2007): Routing zum Polter durch Verschneidung von offroad-Daten mit herkömmlichen onroad-Daten. Vortrag im Rahmen einer Einladung der Landesforstverwaltung Niedersachsen am 14. Juni 2007 in Braunschweig
- BECKER, B. (2006): MatchWood - Teilprojekt 2: Forest Warehouse - Bedarfsgerechte Bereitstellung von Rundholz. Vortrag im Rahmen des II. Statuskolloquiums des BMBF-Verbundprojektes "MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung" am 13.12.2006 in Freiburg
- BAUMANN, T.; BECKER, B.; VÖTTER, D. (2006): Logistik für Fortgeschrittene. Vortrag im Rahmen des Kolloquiums zu Ehren von Prof. Dr. Dr. h.c. G. Becker am 29./30.06.2006 in Freiburg

BECKER, B. (2006): MatchWood - From the standing tree to wood product: Added Value by process-optimization within the scope of near-natural forest-cultivation. Vortrag im Rahmen des "10th Annual Meeting LERFoB - FobAwi" am 16./17.05.2006 in Freiburg

BECKER, B. (2006): MatchWood - Teilprojekt 2: Forest Warehouse - Matching. Vortrag im Rahmen der Auftaktveranstaltung des BMBF-Verbundprojektes "MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung" am 07.02.2006 in Freiburg

BECKER, B. (2006): MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung. Internes Kolloquium des Instituts für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaften am 11.01.2006 in Freiburg

#### Poster:

BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2008): MatchWood - From Trees to Products: Product-specific Allocation of Raw Material to the Wood Industry. Poster zur FORMEC 2008, 02.06.2008 - 05.06.2008, Schmallingenberg

BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2006): MatchWood - Vom Baum zum Produkt (Projektübersicht). Poster zur Forstwissenschaftlichen Tagung 2006, 20.09.06 - 22.09.06, Tharandt

BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2006): MatchWood -From the standing tree to the wood product: Product-specific allocation of raw material to the wood industry. Poster zur 5th International Symposium Wood Structures and Properties, 03.09.06 - 06.09.06, Sliač, Slowakei

BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2006): MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Welches Holz zu welchem Werk?. Poster für die Interforst 2006, 12.07.06 - 16.07.2006, München

### 3 Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht

#### 3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Das Teilvorhaben liefert einen Beitrag zu den förderpolitischen Zielen der vom BMBF formulierten Forschungsfelder über die „Erschließung von Wertschöpfungspotentialen entlang der Forst-Holz-Kette“ und Nachhaltige Bewirtschaftung, Nutzung und Entwicklung von Wäldern und walddreichen Landschaften“. Der derzeitige Stand der Forschung hat bereits auf einem breiten Forschungsfeld wertvolle Erkenntnisse über eine gewinnbringende nachfrageorientierte Bereitstellung von Rundholz an die Holzindustrie geliefert, allerdings handelt es sich weitgehend um individuelle, auf die Firmeninteressenslage angepasste Systeme, die nicht miteinander kompatibel sind. Das abgeschlossene Verbundprojekt MatchWood hat zu dem genannten Forschungsfeld einen wesentlichen Beitrag geleistet und neue Impulse für weitere Forschungsaufgaben zur Optimierung der Forst-Holz-Kette erbracht. Die Untersuchungsmethodik ist konsequent an der praktischen Umsetzung in den beteiligten Betrieben ausgerichtet. Die erzielten Ergebnisse geben Aufschluss über Potentiale zur Steigerung der Wertleistung in der Forst-Holz-Kette. Somit wurden der förderpolitischen Zielsetzung Rechnung getragen.

#### 3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen

Im Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik wurde eine semi-automatische, prozessorientierte Logistikkette einer nachfrageorientierten Bereitstellung von Rundholz an die Holzindustrie entwickelt. Dieses Verfahren setzt sich aus folgenden Arbeitsschritten zusammen:

- **Ermittlung waldwachstumskundlicher Kenngrößen**

Um ein „Warenlager Wald“ zu definieren, sind bestandesbezogene Kenngrößen notwendig. Bei diesem (zusätzlichen) Arbeitsschritt wurden die Betriebsinventurdaten mit den Forsteinrichtungsdaten zu einem Ausgabedatensatz vereint, so dass für jeden Bestand Informationen über die Höhe und den Vorrat, die Grundfläche und der mittlere Durchmesser, die Baumzahl sowie der minimale und maximale Durchmesser je Baumart zur Verfügung stehen.

- **Ableitung von Nutzungsmengen, Sorten und Aufarbeitungskosten**

Aus den bestandesspezifischen Informationen wird der ausscheidende Bestand ermittelt. Über einen Waldwachstumssimulator können neben einer Aussage über die Entwicklung des Bestandes auch die Durchmesser- und Höhenverteilung des ausscheidenden Bestandes hergeleitet werden. Mit einem Kalkulationsprogramm für die Holzernte und Holzvermarktung kann anschließend eine Sortiments- und Qualitätsgliederung erfolgen. Hierbei müssen die Anforderungen der Holzindustrie hinsichtlich des gewünschten Rundholzes berücksichtigt werden. Es wird eine Kostenkalkulation durchgeführt, bei der die unterschiedlichen Holzernte- und Aufbereitungsverfahren entsprechend den Standorts- und Geländebedingungen beachtet werden. Somit liegen für sämtliche Bestände die Nutzungsinformationen in einer Datenbank vor.

- **Allokation und Logistik**

Die hergeleiteten Nutzungsstrategien und –mengen werden nun im „Warenlager Wald“ räumlich im Geographischen Informationssystem dargestellt. Damit ist es möglich, die bestandesspezifischen Daten und die Nutzungsinformationen mit entsprechenden Erntekosten und Erlösen visuell und räumlich darzustellen. Nun können die Bestände selektiert und angezeigt werden, die den Anforderungen der Holzindustrie entsprechen.

- **Routing auf räumlichen Netzwerken**

In diesem Arbeitsschritt wird die kürzeste Route zwischen Wald und Werk berechnet. Um dies zu bewerkstelligen, mussten die land- und forstwirtschaftlichen Wege mit dem öffentlichen Straßennetz verknüpft werden. Damit kann sichergestellt werden, dass der direkte Weg vom Polter zum Werk berechnet werden kann.

- **Gruppenbildung**

Zur Beantwortung einer Anfrage der Holzindustrie müssen aus den potentiellen Erntebeständen die Bestände ausgewählt werden, die bezüglich den Erntebedingungen und dem anschließenden Transport (oder aber auch anderen Kriterien wie Erntekosten und Erlöse) möglichst optimal zueinander liegen. Somit werden einzelne Erntebestände zu sog. Holzernteeinheiten zusammengefasst.

- **Optimale Erntereihenfolge**

Die Frage der optimalen Erntereihenfolge entspricht dem Problem des Handlungsreisenden. In diesem Arbeitsschritt wird der kürzeste Weg zwischen den Beständen berechnet, so dass beispielsweise die Umsetzzeiten von Maschinen oder doppelte Wegstrecken auf ein Minimum reduziert werden.

### **3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Die aus dem Teilprojekt gewonnenen Erkenntnisse werden in Lehrveranstaltungen an der Universität Freiburg an Studenten vermittelt.

Die Erkenntnisse bilden zudem die Grundlage für die Beantragung von neuen Forschungsvorhaben. So wurde im Rahmen des BMBF-Förderprogramms KMU-Innovativ ein Forschungsvorhaben zusammen mit der Abteilung für Fernerkundung und Landschaftsinformationssystem sowie einem Praxispartner beantragt, dass eine Weiterführung zur Praxis- und Anwendungstauglichkeit der im MatchWood erforschten Erkenntnisse vorsieht.

### **3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Im Rahmen des Teilvorhabens konnten alle Arbeiten verwertet werden.

### **3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)**

Die Erkenntnisse und Ergebnisse aus dem Verbundprojekt MatchWood wurden im Rahmen einer Abschlusstagung im Dezember 2008 Entscheidungsträgern und Experten aus der Wissenschaft und Praxis der Forst- und Holzwirtschaft vorgestellt und hinsichtlich der operativen Umsetzung diskutiert. Die Ergebnisse stehen auf der Projekthomepage [www.matchwood.uni-freiburg.de](http://www.matchwood.uni-freiburg.de) über das Projektende hinaus zur Verfügung.

### **3.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

Die Ausgaben wurden entsprechend den zugewiesenen Mitteln eingehalten. Die Einzelzuweisungen sind den beim Projektträger vorliegenden Zwischenverwendungsnachweisen zu entnehmen. Hinsichtlich der Finanzplanung haben sich keine Änderungen ergeben. Das zur Verfügung stehende Budget wurde nicht überzogen und entspricht den Projektausgaben.

Das Projekt wurde in Abstimmung mit dem Projektträger um 4 Monate (von 31.08.2008 auf 31.12.2008) kostenneutral verlängert. Der Zeitplan konnte entsprechend den Vorgaben im Projektantrag eingehalten werden. Die Arbeitspakete verteilten sich regelmäßig über die Projektlaufzeit.

#### 4 Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Forest Warehouse und Logistik  im Verbundprojekt „MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung“		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Becker, Bernd Smaltschinski, Thomas Becker, Gero		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2008
		6. Veröffentlichungsdatum
		7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft Albert-Ludwigs-Universität Freiburg Werthmannstraße 6 79085 Freiburg		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen 0330616A
		11. Seitenzahl 59
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		13. Literaturangaben 31
		14. Tabellen 7
		15. Abbildungen 31
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 53170 Bonn		

## 18. Kurzfassung

Die Entwicklung von forstlichen Nutzungskonzepten ist von modernen, räumlich präzisen und aktuellen Methoden abhängig, die sowohl die Waldstrukturen als auch die Anforderungen der Holzindustrie berücksichtigen. Die Erntemasse, der Zeitpunkt des Eingriffs und die Holzerntemethode sollten sich daher an die Bedürfnisse und Anforderungen der Holzindustrie im Sinne eines „Warenlager Wald“ anpassen.

Das „Warenlager Wald“ ist die Schnittstelle zwischen der Ressource im Wald mit ihrem hohen Heterogenitätsgrad und den Produktlinien in der Holzindustrie, die dem entgegen für eine hohe Rentabilität eine Belieferung mit einem möglichst homogenen Rohstoff verlangen. Das „Warenlager Wald“ erlaubt eine produkt-spezifische Bereitstellung von Rundholz an die Holzindustrie. Neben der quantitativen Belieferung mit dem geforderten Rohstoff sind auch präzise Informationen über Holzmerkmale für eine optimale Produkt- und Produktionsgestaltung notwendig. Das Konzept des „Warenlager Wald“ erlaubt eine lagegenaue Herleitung der Holzerntemenge und der korrespondierenden Holzqualität.

Ziel des Teilprojekts war die Entwicklung von Konzepten und Instrumenten, die eine nachfrageorientierte Zuordnung von Rundholz zulassen. Als Datengrundlage dienen auf der einen Seite die kundenspezifischen Anforderungen der Holzindustrie an das Rundholz, auf der anderen Seite die Forsteinrichtungsdaten, die Betriebsinventur und räumliche Informationen (DTM, DSM, GIS Daten). Diese Daten werden verwendet um geeignete Erntebestände und Erntemethoden in Abhängigkeit von Standorts-, Gelände- und Bodenverhältnisse zu selektieren.

Zusätzlich werden Konzepte und IT-Tools wie Routing, Gruppenbildung oder optimale Erntereihenfolge in das Konzept des „Warenlager Wald“ integriert. So können noch genauere Informationen auf Bestandesebene hergeleitet werden, wodurch die Bereitstellungskette optimiert und beispielsweise eine just-in-time Lieferung an die Holzindustrie garantiert werden kann.

Durch das „Matchen“ / Zusammenführen der bestandesspezifischen Informationen mit den kundenspezifischen Anforderungen kann die Holzindustrie durch die Minimierung von Qualitätsmängeln, von Ausschusswaren, von umfangreichen Vorgängen des Nachsortierens und von Störzeiten im hohen Maße profitieren. Aber auch die Forstbetriebe erzielen durch das Konzept des „Warenlager Wald“ einen höheren Nettoerlös, da die Effizienz und Effektivität in der Forst-Holz-Kette verbessert werden.

## 19. Schlagwörter

Warenlager Wald, Forest Warehouse, Precision Forestry, Forst-Holz-Kette, Logistik, Nutzung

## 20. Verlag

## 21. Preis

## 5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Logistik einer nachfrageorientierten Bereitstellung von Rundholz .....	139
Abbildung 2: Aufbau und Komponenten des "Warenlager Wald" .....	141
Abbildung 3: Verteilung der Stichprobenpunkte (100 x 200 m) bei der Betriebsinventur in einem Waldgebiet.....	144
Abbildung 4: ER-Diagramm der Stichprobenauswertungen der BI .....	145
Abbildung 5: Ausgleich von Höhe und Vorrat über dem Alter als unabhängiger Variablen .....	148
Abbildung 6: Verlauf der Formhöhe über dem Alter und Ausgleich .....	149
Abbildung 7: Durchmesserentwicklung über dem Alter.....	149
Abbildung 8: Entwicklung von minimalem und maximalem Durchmesser in Abhängigkeit vom mittleren Durchmesser .....	149
Abbildung 9: Anpassung der WEIBULL-Verteilung an einen Datensatz aus der BI .....	150
Abbildung 10. Entwicklung der Durchmesserverteilungen in 20-jährigen Altersklassen. Linke Verteilung Alter 21-40.....	150
Abbildung 11. Höhe im Alter 100 über dem $dGz_{100}$ aufgetragen (Nadelbaumarten).....	151
Abbildung 12: Höhe im Alter 100 über dem $dGz_{100}$ aufgetragen (Laubbaumarten) .....	154
Abbildung 13: Berechnung der Mittelhöhe eines Bestandes über die Aufnahmedaten der Forsteinrichtung (Alter, $dGz_{100}$ ) und den Alterhöhenfächer nach Gleichung [7].....	156
Abbildung 14: Baumhöhen BI über dem Alter aufgetragen. Blaue Linie: Ausgleich nach [1]. Weitere Erläuterungen siehe Text.....	156
Abbildung 15: Proportion $P = H_{FE} / H_{BI}$ bei den Höhen (Pfeil linke Seite) wird auf die Vorratsschätzung übertragen.....	157
Abbildung 16: Entwicklung von Formhöhe und mittlerem Durchmesser einer Baumart .....	157
Abbildung 17: Minimaler und maximaler Durchmesser zu gegebenem mittlerem Durchmesser.....	158
Abbildung 18: WEIBULL-Verteilung nach Altersklassen .....	158
Abbildung 19: Eingabe der Behandlung von Erntebeständen in den Waldwachstumssimulator W+ .....	160

Abbildung 20: Simulation mit dem Waldwachstumssimulator W+ (das Diagramm zeigt den verbleibenden [grün] und den ausscheidenden Bestand [rot]).....	161
Abbildung 21: Festlegung der Aushaltungskriterien im Holzernteprogramm 7.1 der FVA Baden-Württemberg.....	162
Abbildung 22: Sortiments- und Qualitätsklassifikation im Holzernteprogramm 7.1 .....	163
Abbildung 23: Nachfrageorientierte Bereitstellung von Rundholz, © Landesvermessungsamt Baden-Wuerttemberg, 2005.....	165
Abbildung 24: NAVTEQ-Daten (blau) und ATKIS-Daten (Rot). Fast alle roten Knoten mussten neu berechnet werden.....	167
Abbildung 25: Routing von einem Holzpolter im Wald (2) zu einem Ziel (1) auf dem öffentliche Straßennetz .....	168
Abbildung 26: Lokalisierung von Beständen (gelb), die einer Kundenanfrage entsprechen. Wald grün .....	172
Abbildung 27: Erntebestände und Wegenetz ohne Darstellung des Waldes.....	173
Abbildung 28: Punkte auf dem Wegenetz (gelb), die die Bestände repräsentieren und die Distanzen zwischen den Beständen (grün) als Linienlayer.....	173
Abbildung 29: Punkte auf dem Wegenetz (gelb) und minimaler Spannbaum.....	174
Abbildung 30: Gruppen von Erntebeständen. Rot umrandet Einzelbestände, blau umrandet sonst .....	174
Abbildung 31: Erntereihenfolge aus Erfahrung 20 km (links) und über ein Heuristik 11 km (rechts).....	176

## 6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zuordnung von Baumarten zu Baumartengruppen .....	145
Tabelle 2: Parameter der Funktionen [1] bis [6] für Nadelbaumarten .....	152
Tabelle 3: Parameter der Funktionen [1] bis [6] für Laubbaumarten .....	153
Tabelle 4: Parameter a, b und d der Ausgleichsfunktion SL [7] für die Baumarten Buche, Eiche, Fichte und Kiefer zum Bonitierungsalter 100 .....	155
Tabelle 5: Kostenkalkulation, erntekostenfreie Erlöse .....	164
Tabelle 6: Vorräte innerhalb der Gruppen .....	175
Tabelle 7: Vorräte und erntekostenfreier Erlös .....	175

## 7 Literaturverzeichnis

- BECKER, B., SMALTSCHINSKI, TH., KLÄDTKE, J., BECKER, G. (2009): MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Kundenspezifische Zuordnung von Erntebeständen und Sortimenten. *AFZ / Der Wald* No. 2, S. 62 – 64
- BECKER, B., KLÄDTKE, J. (2008): MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Zuordnung von Erntebeständen unter Berücksichtigung von Ernteplanung und kunden-spezifischen Anforderungen. *Freiburger Forstliche Forschung*, 2008 (76): 53 (Forstwissenschaftlichen Tagung 2008: Ressourcenknappheit und Klimaänderung: Herausforderungen für die Forstwissenschaft, 24.09.2008 - 27.09.2008, Freiburg), Spiecker, Heinrich; von Teuffel, Konstantin (Hrsg.)
- BECKER, B., KLÄDTKE, J. (2008): MatchWood – From Trees to Products: Allocation of Stands in the context of Harvesting Planning and user-specific Requirements. *Proceedings IUFRO ALL-D3-Conference* (IUFRO ALL-D3-Conference - Pathways to Environmentally Sound Technologies for Natural Resource Use, 15.06.2008- 20.06.2008, Sapporo, Japan)
- BECKER, B., KLÄDTKE, J., BECKER, G. (2008): MatchWood – From Trees to Products: Product-specific Allocation of Raw Material to the Wood Industry. *Proceedings FORMEC 08* (FORMEC '08, 02.06.2008 - 05.06.2008, Schmallenberg), Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (Hrsg.)
- BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2007): MatchWood - From Trees to Products: Product-specific Allocation of Round Wood to the Timber Industry. 3rd Forest Engineering Conference, Mont Tremblant, Canada

- BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2006): MatchWood –From the standing tree to the wood product: Product-specific allocation of raw material to the wood industry. 5<sup>th</sup> International Symposium Wood Structures and Properties, Sliač, Slovakia
- BECKER, B.; KLÄDTKE, J.; BECKER, G. (2006): MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Welches Holz zu welchem Werk? Interforst 2006, München
- BECKER, G. (2004): Prozessorientierung in der Forstwirtschaft. AFZ - Der Wald, Nr. 11-12, 566-567.
- BECKER, G.; HECKER, M. (2002): Modellprojekt einer integrierten Holzbereitstellungs- und Logistikkette Wald-Werk für die Forstbetriebsgemeinschaft „Waldmärkerschaft Uelzen eG“. Holzabsatzfond, Bonn
- BECKER, G.; RÖTTGEN, TH. (2001): Application Service Providing. Die zukünftige IT-Lösung für den Forstbetrieb? AFZ - Der Wald Nr. 3, 116-118.
- BECKER, G. (1997): Holznutzung und Holzbereitstellung im Informationszeitalter. AFZ - Der Wald, Nr. 3, 128-132.
- BODELSCHWINGH, E. v.; BAUER, J.; LONGO, M. (2003): Management von Informations- und Materialflüssen mittels der Logistiksoftware GeoMail. AFZ-DerWald 17: 855-857
- BODELSCHWINGH, E. v.; ZIESAK, M. (2001): Bessere Logistik im Forst hilft Kosten sparen Improved logistics in forestry saves costs. Holz-Zentralblatt, 127. Jahrgang, Nr. 66,: 874.
- DIJKSTRA, E. W. (1959): A note on two problems in connexion with graphs. In: Numerische Mathematik. 1, S. 269–271
- Hilfstabellen für die Forsteinrichtung (1966, Bd1/2; 1993): Ministerium f. Ernährung Landw. und Forsten Baden-Württemberg. Stuttgart
- HRADETZKY, J.; SCHÖPFER, W. (2001): Das Softwareprodukt HOLZERNT. Eine Entscheidungshilfe für die Holzernte und die Holzvermarktung. AFZ 56, 1100-1101
- HUG, J., (2004):Optimierung von Geschäftsprozessen in der Forstwirtschaft durch den Einsatz von Informationstechnologie am Beispiel der Holzbereitstellung auf Revierebene. Dissertation Universität Freiburg.
- KÄNDLER, G.; BÖSCH, B. (2001): Die Betriebsinventur als Grundlage für Planung, Steuerung und Kontrolle des Forstbetriebes. Wissenstransfer in Praxis und Gesellschaft: FVA-Forschungstage. Freiburg, 2001, S. 252–265
- KRUSKAL, J. (1956): On the shortest spanning subtree and the traveling salesman problem. In: Proceedings of the American Mathematical Society. 7, S. 48–50

- MERKEL, H. (1995): Logistik Managementsysteme, München
- MICHAILOFF, J. L. (1943): Zahlenmässiges Verfahren für die Ausführung der Bestandeshöhenkurven. Sonderdr. Fowi. Cbl. u. Tharandter Forstl. Jb.H. 6
- NÄSLUND, M. (1936/37): Die Durchforstungsversuche der forstlichen Versuchsanstalt Schwedens im Kiefernwald. M.S.S.
- PFOHL, H.-C. (1995): Logistiksysteme, 5.Auflage, Berlin
- SCHOBER, R. (1957): Ertragstabeln wichtiger Baumarten, Neubearbeitet von Schober. Hann.
- SMALTSCHINSKI, TH. (1981): Bestandesdichte und Verteilungsstruktur. Diss. Freiburg: 126 S.
- SMALTSCHINSKI, TH. (1995) :Geographische Informationssysteme in der Forstwirtschaft am Beispiel von ARC/INFO. Deutscher Verband Forstlicher Versuchs- und Forschungsanstalten, Sec. Forstl. Biometrie u. Informatik, Quednau, Freising: 167-175
- SMALTSCHINSKI, TH. (2001): Regionale Waldwachstumsprognose. Schriftenreihe Freiburger Forstliche Forschung, Bd. 12: 108 S.
- SMALTSCHINSKI, TH., BECKER, G. HENTSCHEL, S.(1999): Aufbau und Nutzung eines GIS-gestützten Informationssystems in Thüringen. AFZ-DerWald, 1999, Heft 3, 115-116
- STEINHAUSEN, D., LANGER, K. (1977): Clusteranalyse, Einführung in Methoden und Verfahren der automatisierten Klassifikation. Walter de Gruyter-Berlin-New York, SS. 205
- WIEDEMANN, E. (1939): Untersuchungen der Preußischen Versuchsanstalt über Ertragstafelfragen. Mitt. aus Forstwissenschaft u. Forstwirtschaft 10 (4): 40 S.
- YUE, C.; KOHNLE, U.; HEIN, S. (2008): Combining tree- and stand-level modulus: A new approach to growth prediction. Forest Science 54 (5), S. 553-566

## 8 Anhang

keine

# Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik

Abteilung für Fernerkundung und  
Landschaftsinformationssysteme

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

## Schlussbericht

---

Zuwendungsempfänger: Institut für Fernerkundung, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	Förderkennzeichen: 0330616A
---	--------------------------------

---

Vorhabenbezeichnung:

MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung

Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik

Nebojsa Balic

---

Laufzeit des Vorhabens:

1. September 2005 bis 31. Dezember 2008

---

Berichtszeitraum:

1. September 2005 bis 31. Dezember 2008

---

## **MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung**

### **Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik**

Nebojsa Balic

Abteilung für Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme, Universität Freiburg

Freiburg, Juni 2009

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1.</b>	<b>Kurze Darstellung des Teilvorhabens</b>	<b>195</b>
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	195
1.2	Vorraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	195
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	197
1.4	Wissenschaftliche und technische Anknüpfung	198
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	198
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>199</b>
2.1	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans	199
2.2	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	199
2.3	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	199
<b>3</b>	<b>Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht</b>	<b>200</b>
3.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	200
3.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen	200
3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	203
3.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	204
3.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)	204

---

3.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	204
<b>4</b>	<b>Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)</b>	<b>205</b>
<b>5</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>207</b>
<b>6</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>207</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>207</b>
<b>8</b>	<b>Anhang</b>	<b>208</b>

## 1. Kurze Darstellung des Teilvorhabens

### 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Hauptaufgabe des Teilprojekts 2 „FOREST WAREHOUSE“ besteht in der Bereitstellung der in dem Teilprojekt 1 ermittelten Bestandsdaten. Zweckmäßigerweise wird hierbei die Bereitstellung der Daten per Internet angestrebt, um jederzeit Zugriff von unterschiedlichen Entscheidungs- bzw. Informationsträgern garantieren zu können. Hierbei ist es sicherlich wesentlich, nicht nur ein lokal zentral betriebenes System gleichsam als Insellösung zu entwickeln, sondern den Zugriff auf verteilte Daten innerhalb und außerhalb des Projekts sicherzustellen.

Aufgabe von Felis in TP2 war es, ein Austauschrahmenwerk auf OpenGIS-Standards (die den State-Of-The-Art widerspiegeln) aufzusetzen, um die Möglichkeit zur Verfügung zu stellen, auf unterschiedliche verteilte Datenquellen zuzugreifen, Daten anzubieten und ein Maximum an Interoperabilität zu gewährleisten.

Die erstellte Austauschplattform basiert auf Open-Source Werkzeugen, die auf OGC<sup>1</sup> (OGC 2008) Standards fußen. Durch die Nutzung von Open-Source Software wurde eine kostenneutrale Lösung bereitgestellt.

Des Weiteren wurde die Entwicklung und Implementierung eines eigenen Webdienstes durchgeführt, der mit der OGC WPS Spezifikation in Einklang steht. Der von der OGC erlassene WPS<sup>2</sup> (OGC 2008A) Webdienst wurde auf der Basis eines Algorithmus für die automatische Extrahierung von Schluchten zur Verfügung gestellt wurde. Dabei kam eine Applikation, die von der Firma 52° North (52° North 2008) entwickelt wurde, zum Einsatz.

### 1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Teilprojekt wurde, mit einer vom Projektträger geförderten Stelle für 12 Monate über die Projektlaufzeit verteilt an der Abteilung für Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme der Universität Freiburg durchgeführt. Insgesamt wirkten 5

---

<sup>1</sup> Open Geospatial Consortium

<sup>2</sup> WebProcessing Service

Personen zeitweise am Teilprojekt mit: die Projektleiterin (ca.10% ihrer Arbeitszeit), ihr Stellvertreter (ca. 10 % seiner Arbeitszeit), einem wissenschaftlichen Mitarbeiter (ca 10% seiner Arbeitszeit), und ein externer Mitarbeiter und ein Fachberater, der über einen Werkvertrag für 2 Monate finanziert wurde und die Nutzeransprüche abfragte.

Die komplette IT Arbeit wurde innerhalb der FELIS Abteilung durchgeführt. In derselben Abteilung wurden alle eingesetzten Hardware- und Softwarekomponenten beschafft und bereitgestellt.

Für die Entwicklung des Teilprojekts wurden die INSPIRE<sup>1</sup> Richtlinien beachtet. INSPIRE entstand aus dem Bedarf, interoperable Architekturen und standardisierte Schnittstellen für den Austausch von räumlichen Daten zu schaffen, um umweltbezogene Probleme unter einem gemeinsamen Standard zu bearbeiten. Ziel von INSPIRE ist es, eine Geodateninfrastruktur zu schaffen. Die Initiative ist heute eine Richtlinie und verpflichtet die europäischen Mitgliedsländer die Richtlinie in nationales Recht zu übernehmen.

Für das Austauschrahmenwerk wurden die Richtlinien und OGC Standards berücksichtigt. Das Austauschrahmenwerk basiert auf einer 3-Ebenen-Architektur:

- 1) Die Datenebene bietet unterschiedliche native Datenzugriffsprotokolle (z.B. ODBC etc) verbunden mit einer Authentifizierung zu den darunterliegenden Datenquellen und stellt der zweiten Ebene "Modellierung und Services" OGC kompatible Web Services (WFS<sup>2</sup>,WMS<sup>3</sup>) zur Verfügung,
- 2) Die zweite Ebene "Modellierung und Services" als Mittelebene kommuniziert ebenfalls über Web Services und bietet eine Toolbox von Diensten (Visualisierung, Klassifikation etc.) der dritten Ebene,
- 3) Die Informationsebene dient als 3. Ebene der Plattform für Benutzeranwendungen und beinhaltet ein Content Management System und Applikationen.

---

<sup>1</sup> Infrastructure for Spatial Information in Europe

<sup>2</sup> Web Feature Service (OGC 2008B)

<sup>3</sup> Web Mapping Service (OGC 2004)

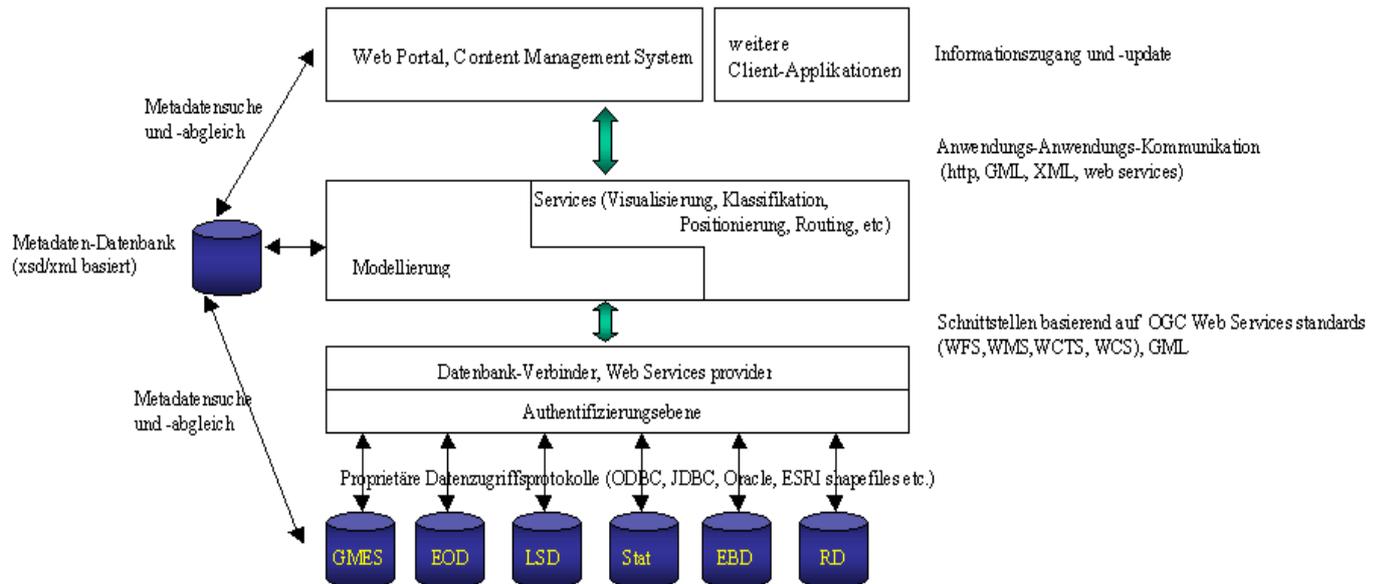


Abbildung 1 Struktur des Datenaustausch-Rahmenwerks

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Der Ablauf des Projektes wird hier nach Projektjahren gegliedert, aufgelistet:

2006

1. Recherchen und Analyse der Fachliteratur.
2. Entwicklung eines Musterformulars zur Beschreibung von Anwendungsfällen, die dann als Grundlage für die Gestaltung der Plattform dienen.
3. Die Entwicklung einer Plattform, die aus einer Implementierung von Web Mapping (WMS) – und Web Feature (WFS) Services und der dazu verfügbaren Open-Source-Server (Mapserver von der Universität Minnesota (UMN 2008) und Geo-Server (GeoServer 2008)) besteht. Bei Anwendung dieser Server wurden die angebotenen Dienste mit eigens dafür entwickelten Funktionen (Zoom, Digitalisierung, Abfrage) erweitert.
3. Der Einbau der oben erwähnten WFS- und WMS-Server in den Open-Source-Servern "Apache" und „Tomcat“. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Konfiguration der beiden Server.
4. Die Entwicklung eines eigenen OGCs Web Processing Service, mit dessen Hilfe der Nutzer mit Internetzugang eigene Daten verarbeiten können ohne dazu ein GIS System besitzen zu müssen. Dabei ist die Entwicklung und Umsetzung beispielhaft

auf der Basis der Algorithmen für die automatische Extrahierung der Schluchten erfolgt.

2007.

1. Erweiterung der bestehenden Plattform mit neuen Funktionalitäten (Pufferung, die Konstruktion von konvexen Hüllen, die Berechnung der Polygonfläche usw.). Erstellung der Funktionalitäten einer PostgreSQL Datenbank, die an die Austauschplattform angebunden wird.
2. Beschaffung der Digitalen Gelände Modellen aus Teilprojekt 1 und Entwurf des Algorithmus für die automatische Extrahierung der Schluchten.
3. Programmierung der Schluchtenalgorithmen in Java.

2008

1. Der Umbau der Plattform mittels OpenLayers (OpenLayers 2008) Technologie
2. Aufbau einer Benutzeroberfläche mit eingebauten Funktionalitäten wie Navigation, Digitalisierung und Formatumwandlung.
3. Implementierung des Algorithmus für die Schluchtenextrahierung als eine zum OGC WebProcessingService kompatible Webapplikation.
4. Installation eines Servers für die Metadaten

#### **1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfung**

#### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Während der gesamten Projektlaufzeit wurde intensiv mit dem Personen von FELIS die im Teilprojekt 1 beschäftigt waren, zusammengearbeitet. Alle Daten, die im Rahmen des TP1 erstellt worden sind, wurden in der entwickelten Datenstruktur angelegt.

Eine Zusammenarbeit mit externen Stellen wurde vorbereitet. Eine Einbindung externer Datensätze scheiterte aber an dem Bedenken, die die Teilnehmer hatten, ihre Daten verfügbar zu machen.

## **2 Eingehende Darstellung**

### **2.1 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans**

In diesem Teil des Teilprojektes 2 wurde durch die Implementierung und Verknüpfung folgender OGC Services - WMS, WFS, WPS und WCS - die softwaremäßige Voraussetzung für ein Geodaten-Austauschrahmenwerk geschaffen, das außerdem die INSPIRE Direktive erfüllt.

### **2.2 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen**

Den Projektmitarbeitern sind keine derartigen WebProcessing Services, wie sie in FELIS entwickelt wurden, bekannt. Die Entwicklung von Web Services und OGC als auch INSPIRE Standards hat allgemein an Dynamik gewonnen.

### **2.3 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

Die Veröffentlichung der Ergebnisse fand in Form von Vorträgen statt.

Die detaillierte Beschreibung des Algorithmus für die Schluchterkennung sowie dessen Einsatz als der WebProcessingService wurde als Teil der Doktorarbeit von Nebojsa Balic veröffentlicht. Eine Veröffentlichung in einer Wissenschaftszeitung ist in Bearbeitung.

### **3 Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht**

#### **3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms**

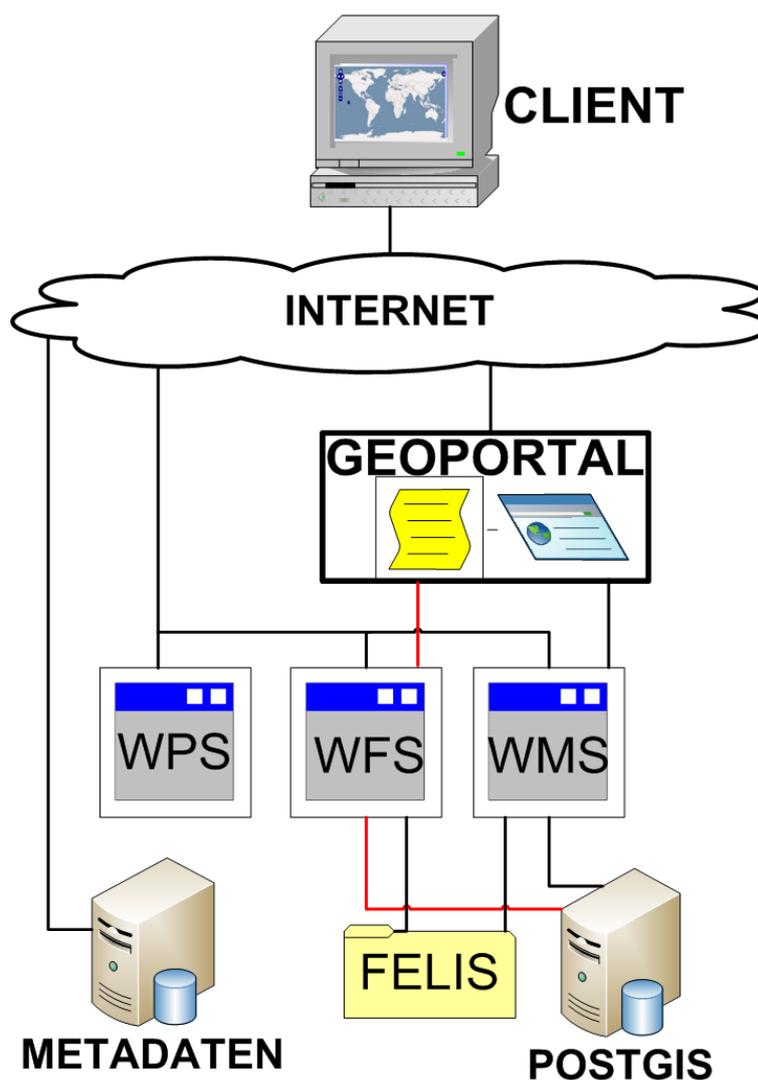
Durch die Anwendung der Open Source Werkzeuge wurde eine Integration der bestehenden sowie der eigen entwickelten Web-Dienste erreicht. Dies zeigt somit die Möglichkeiten zur effizienten Nutzung von Geodaten.

#### **3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen**

##### **a) Aufbau einer Geodateninfrastruktur**

Die verfügbaren Daten wurden auf einem Apache Server angelegt. Außerdem, ist eine PostGis Datenbank installiert und mit einem Teil der Daten ausgestattet. Ein Metadatenserver ist installiert. Alle Server sind mit den Authentifizierungsprotokollen versehen, um korrekte Zugriffsrechte zu gewährleisten.

Es kann auf die Daten und die implementierten Anwendungen, die standardisierte OGC Web-Diensten zur Verfügung stellen, zugegriffen werden.



**Abbildung 2 Schematische Darstellung der aufgebauten Datenstruktur**

Es wurde ein MapServer installiert, der in einem Open-Source Projekte an der Universität Minnesota entwickelt wurde. Dieser Server erfüllt die von der OGC verabschiedeten Standards und bietet WebMapping - Services für die Erstellung dynamischer Karteninhalte an. Des Weiteren wurde ein GEOSERVER bereitgestellt der mit dem standardisiertem WebFeatureService kompatibel ist. Auf diesem Server sind die Vektordaten angelegt. Die bestehenden Anwendungen sind mit einem WebProcessing Server erweitert, dabei kam eine Open-Source Anwendung, die von der Firma 52° North entwickelt wurde, zum Einsatz. Der Server erlaubt es, verschiedene Funktionalitäten einzubinden und diese per Internet zur Verfügung zu stellen. Neben den bestehenden Prozessierungsroutinen wie Pufferung, Douglas Peucker Algorithmus, ist auf diesem Server die Prozedur für die automatische Erkennung von Schluchten installiert.

## b) Entwicklung eines Geoportals

In der Funktionsebene ist ein Geoportal angesiedelt das auf OpenLayers Technologie beruht. Mit der Entwicklung dieser Geodatenplattform sind technische Rahmenbedingungen geschaffen, um auf verteilte Datenquellen und Dienste zugreifen zu können.

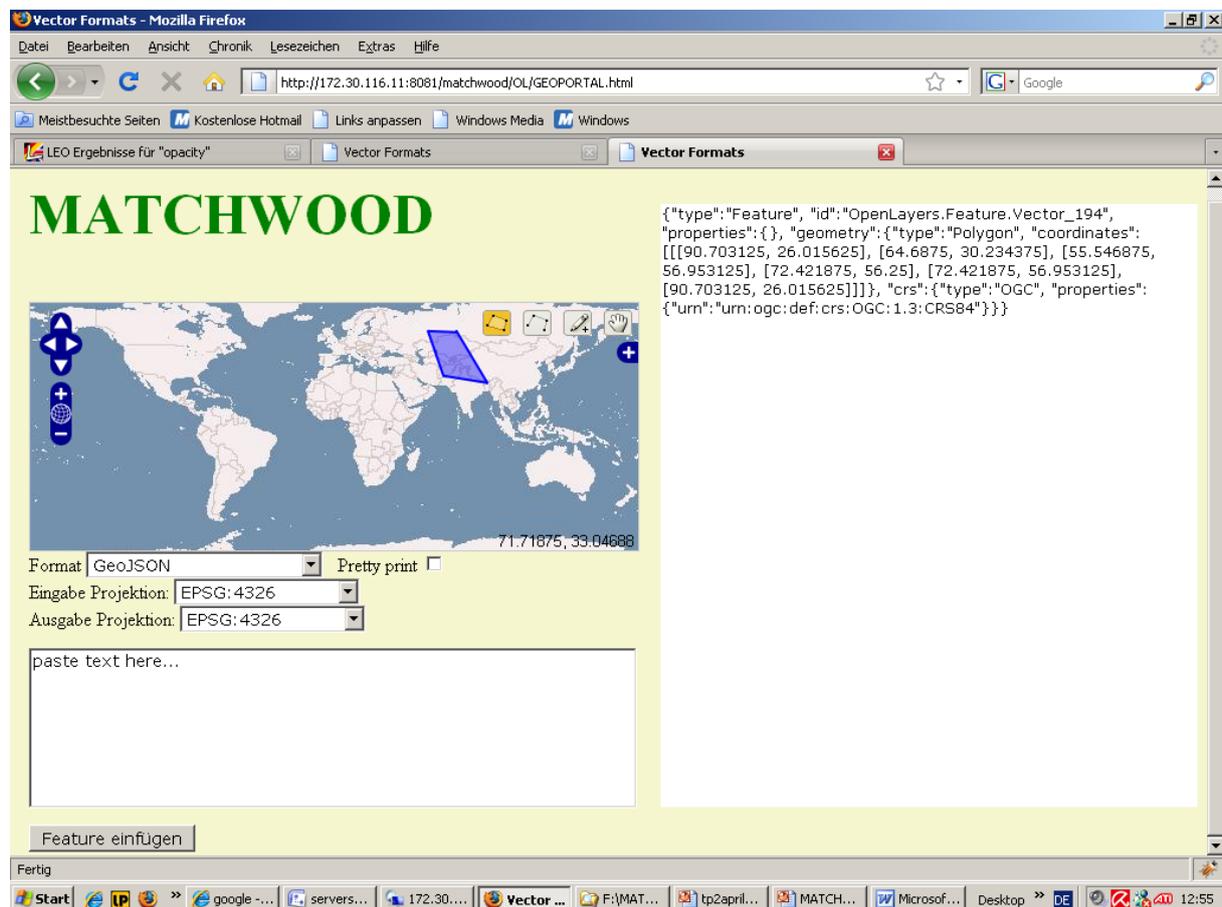
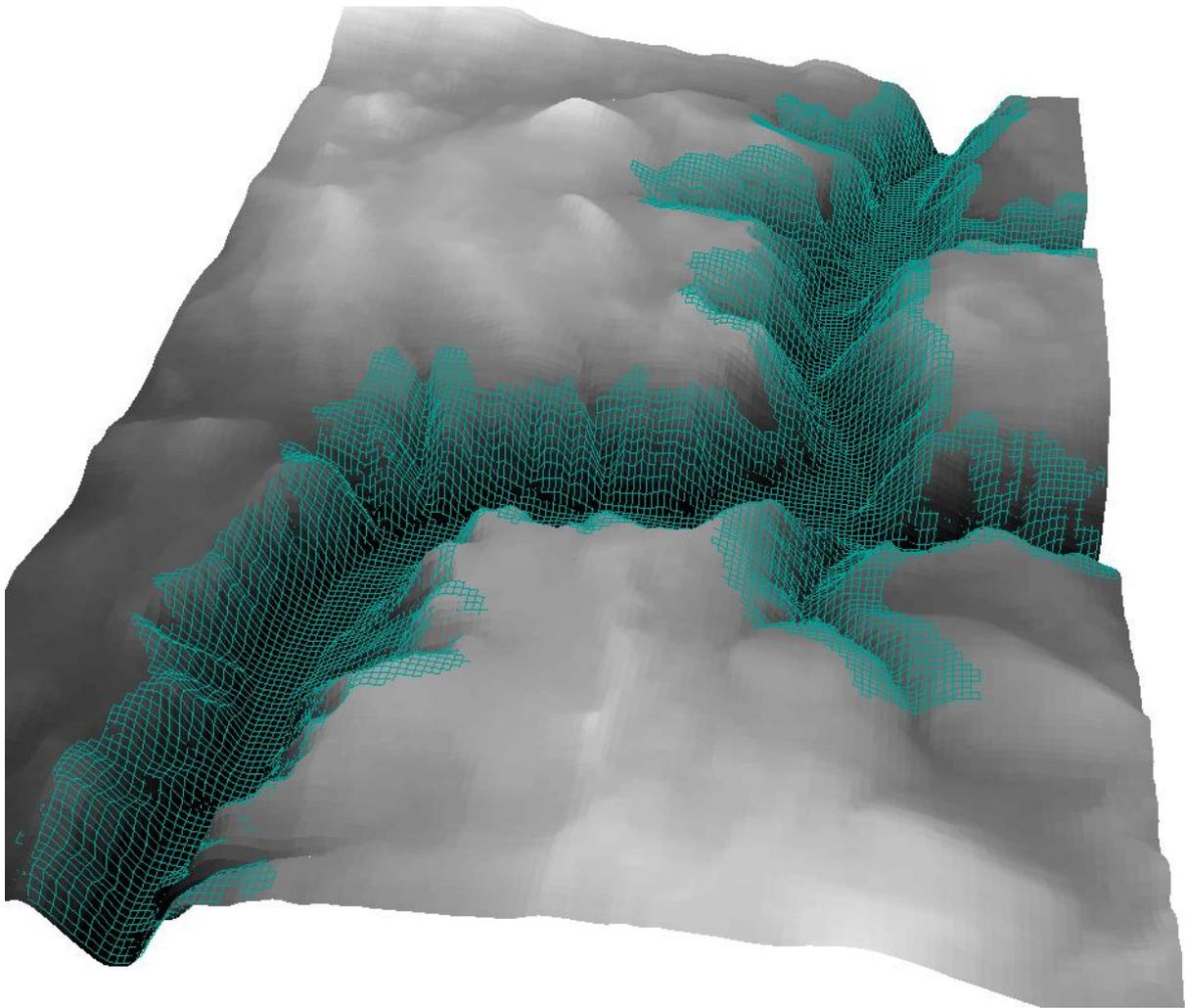


Abbildung 3 Die Benutzeroberfläche des entwickelten Geoportals

## c) Der Algorithmus für die Schluchtererkennung

Im Rahmen des Projekts wurde ein Algorithmus entwickelt, der auf Höhenwerte aus dem Digitalen Gelände Model (DGM) und Raumgrößen beruht. Mit Hilfe dieses Algorithmus sind Schluchten auch unter Wald erkennbar.



**Abbildung 4** Die extrahierte Schlucht, das als Netz auf das Digitale Gelände Model projiziert wurde, wird hier als dreidimensionale Abbildung visualisiert

### 3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans

Die aufgebaute Geodateninfrastruktur kann auch von verschiedenen Nutzern für unterschiedliche Zwecke verwendet werden.

Die bestehende Benutzeroberfläche kann mit neuen Funktionalitäten (z.B. einem Modul für den automatischen Aufruf und die Verkettung von OGC erlassenen We-diensten) erweitert werden.

Die Anwendung des Algorithmus für die Schluchtenerkennung besitzt ein großes Po-tenzial für die Geländeanalyse und erübrigt teure Geländeuntersuchungen vor Ort.

Durch die Anwendung kostenloser Open Source Werkzeuge wurden Beschaffungs-kosten für kommerzielle Softwarelösungen eingespart.

### **3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

Die Freigabe von Daten für den Internet unterstützten Austausch hat sich als schwierig erwiesen.

Die Anbindung der Postgis Funktionalitäten durch ein PHP Skript blieb erfolglos.

### **3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)**

Die Präsentation der erzielten Ergebnisse erfolgte im Rahmen der Matchwood Präsentationen.

### **3.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

Der im Antrag formulierte Zeitplan konnte eingehalten werden.

## 4 Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)	
	Schlussbericht	
3. Titel		
Forest Warehouse und Logistik		
im Verbundprojekt „MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung“		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]		5. Abschlussdatum des Vorhabens
Koch, Barbara		31.12.2008
Balic, Nebojsa		6. Veröffentlichungsdatum
		7. Form der Publikation
		Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
Abteilung für Fernerkundung und Landschaftsinformationssysteme		
Albert-Ludwigs-Universität Freiburg		10. Förderkennzeichen
Tennenbacherstraße 4		0330616A
79085 Freiburg		11. Seitenzahl
		18
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)		13. Literaturangaben
Bundesministerium für		9
Bildung und Forschung (BMBF)		14. Tabellen
53170 Bonn		0
		15. Abbildungen
		4
16. Zusätzliche Angaben		

17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)

Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 53170 Bonn

18. Kurzfassung

Da der Schwerpunkt des Teilprojekts 2 in dem effizientem Austausch der im Teilprojekt 1 ermittelten Daten besteht, lag es nahe, das Internet zu verwenden um diese Aufgabe zu erfüllen. Der von FELIS durchgeführte Teil im Teilprojekt 2 hat dabei zum Ziel, eine Austauschplattform für Geodaten auf OGC kompatiblen Web Diensten aufzubauen. Demzufolge wurden die WMS<sup>1</sup>, WFS<sup>2</sup>, WCS<sup>3</sup> und WPS<sup>4</sup> OGC<sup>5</sup> Dienste in die Plattform integriert. Zugriff auf die Daten erfolgte über eine Benutzeroberfläche, die im Rahmen des Projekts entwickelt wurde. Die Benutzeroberfläche setzt die Openlayer Technologie ein und bietet folgende Funktionalitäten:

- Digitalisieren
- Navigationswerkzeuge
- Anbindung zu einer PostGIS Datenbank
- Formatumwandlung von Geodaten

Es wurden darüber hinaus weitere Anwendungsmöglichkeiten die über das Internet abgerufen werden können, untersucht. In diesem Zusammenhang wurde der Algorithmus für die automatische Erkennung von Schluchten als ein WPS<sup>4</sup> implementiert.

19. Schlagwörter

20. Verlag

21. Preis

---

<sup>1</sup> Web Mapping Service

<sup>2</sup> Web Feature Service

<sup>3</sup> Web Catalogue Service

<sup>4</sup> Web Processing Service

<sup>5</sup> Open Geospatial Consortium

## 5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Struktur des Datenaustausch-Rahmenwerks.....	197
Abbildung 2 Schematische Darstellung der aufgebauten Datenstruktur.....	201
Abbildung 3 Die Benutzeroberfläche des entwickelten Geoportals.....	202
Abbildung 4 Die extrahierte Schlucht (das grüne Netz) aufgelegt auf Digitales Gelände Model angezeigt in der dreidimensionalen Abbildung .....	203

## 6 Tabellenverzeichnis

Keine

## 7 Literaturverzeichnis

BECKER, B., SMALTSCHINSKI, TH., KLÄDTKE, J., BECKER, G. (2009): MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Kundenspezifische Zuordnung von Erntebeständen und Sortimenten. AFZ / Der Wald No. 2, S. 62 - 64

52° NORTH. (2008): Web Processing service. Online unter URL: <<https://52north.org/twiki/bin/view/Processing/52nWebProcessingService>> (Letzter Zugriff August 1, 2008)

GEO SERVER. (2008): Offizielle Web Seite. Online unter URL: <<http://geoserver.org/display/GEOS/Welcome>> (Letzter Zugriff Oktober 4, 2008)

OGC. (2008): About OGC. Online unter URL: <<http://www.opengeospatial.org/ogc>> (Retrieved July 31, 2008).

OGC. (2008A): OpenGIS Web Processing Service. Online unter URL:<<http://www.opengeospatial.org/standards/wps>> (Letzter Zugriff Juli 31, 2008).

OGC. (2008B): OpenGIS Web Feature Service Implementation Specification. Online unter URL:<<http://www.opengeospatial.org/standards/wfs>> (Letzter Zugriff Juli 31, 2008).

OGC (2004): OGC Web Map Service Interface. Online unter URL:  
<<http://www.opengeospatial.org/standards/wms>>(Retrieved October 6, 2008)

OPENLAYERS (2008): OpenLayers: Free Maps for the Web. Online unter URL:  
<<https://www.openlayers.org>> (Letzter Zugriff August 25, 2008)

UMN MAPSERVER. (2008): Welcome to MapServer. Online unter URL:  
<[http://mapserver.gis.umn.edu/index\\_html?set\\_language=en](http://mapserver.gis.umn.edu/index_html?set_language=en)> (Letzter Zugriff  
Juni 31, 2008)

## 8 Anhang

Keine

# Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik

Abteilung Waldnutzung

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
Baden-Württemberg

## Schlussbericht

---

Zuwendungsempfänger: Abteilung Waldnutzung, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg	Förderkennzeichen: 0330616B
--	--------------------------------

---

Vorhabenbezeichnung:

MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im  
Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung

Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik

Udo Hans Sauter

Bertil Burian

Franka Brüchert

---

Laufzeit des Vorhabens:

1. September 2005 bis 31. Dezember 2008

---

Berichtszeitraum:

1. September 2005 bis 31. Dezember 2008

---

## **MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung**

### **Teilprojekt 2: Forest Warehouse und Logistik**

Udo Hans Sauter, Bertil Burian, Franka Brüchert  
Abteilung Waldnutzung, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Freiburg, Juni 2009

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1 Kurze Darstellung des Teilvorhabens</b>	<b>213</b>
1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung	213
1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	214
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens	214
1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfung	215
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen	215
<b>2 Eingehende Darstellung</b>	<b>216</b>
2.1 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans	216
2.2 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	216
2.3 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	216
<b>3 Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht</b>	<b>217</b>
3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	217
3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen	217
3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans	230
3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	230
3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer	230

---

3.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	230
<b>4 Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts</b>	<b>231</b>
<b>5 Abbildungsverzeichnis</b>	<b>233</b>
<b>6 Tabellenverzeichnis</b>	<b>233</b>
<b>7 Literaturverzeichnis</b>	<b>233</b>
<b>8 Anhang</b>	<b>236</b>
<b>Technische Details</b>	<b>236</b>
<b>Begriffsdefinitionen</b>	<b>243</b>

## 1 Kurze Darstellung des Teilvorhabens

### 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Die Situation der deutschen Forst- und Holzwirtschaft ist derzeit durch einen Konzentrationsprozess auf Seiten der Sägeindustrie geprägt. Verschiedene Studien der letzten zehn Jahre bestätigen die Entwicklung hin zu wenigen Betrieben mit großen Verarbeitungskapazitäten (LÜCKGE/WEBER 1997, VDS 1999, RETTENMEIER 2001 und 2003, MANTAU 2001, 2003 und 2006). Die Konsequenz dieser Entwicklung ist eine notwendige ganzjährige Versorgung dieser Betriebe mit großen Mengen an frischem, qualitativ hochwertigem Rundholz.

Grundvoraussetzung für die Belieferung der Holzindustrie mit frischem Rohstoff ist eine zügige Abfuhr des eingeschlagenen und an die Waldstraße vorgelieferten Rundholzes. Wissenschaftliche Untersuchungen über die einzelnen Prozessschritte der Holzerntekette von Waldort (Holzeinschlag) bis zum verarbeitenden Betrieb (Sägewerk oder Papierindustrie) zeigen eine Vielzahl von Einzelprozessen mit unterschiedlichen Aufgaben und Verantwortungen sowie verschiedenen Schnittstellen zwischen einzelnen Akteuren der Prozesskette auf (z.B. LFV Ba-Wü 2002, HUG 2004, v. BODELSCHWINGH 2005 und 2006). Zudem stellten die Untersuchungen fest, dass aufgrund der vielen Schnittstellen der Koordinations- und Abspracheaufwand zwischen den Akteuren sehr zeitintensiv ist, wodurch der Zeitraum zwischen der Holzernte und der Ankunft des Rundholzes im Werk über 40 Tage betragen kann (z.B. v. BODELSCHWINGH 2005).

Alle Beteiligten an der Forst-Holz-Kette bewerten die Schnittstelle zwischen Holzbereitstellung im Wald und dem schnellstmöglichen Transport an die Verarbeitungsstelle als den vordringlich zu optimierenden Teil der Logistikkette. Gleichzeitig liegt hier ein relativ leicht zu realisierendes Zeit- und Kosteneinsparungspotential (HAUG 2004).

## **1.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Die Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) mit ihrer Abteilung Waldnutzung bearbeitet seit langem den Forschungsbereich „Rundholzlogistik“, in dem die Bereitstellung von Rundholz für die weitere industrielle Verarbeitung inhaltlich angesiedelt ist. Die Landesforstverwaltung Baden-Württemberg (LFV) entwickelt und betreibt seit 1992 das Forstliche Geoinformationssystem „FoGIS“ und auf Sachdatenebene seit 1998 das Forstliche Organisations-, Kommunikations- und Unternehmensführungs-Informationssystem FOKUS 2000. Mit mobilen Datenerfassungsgeräten erfolgt die Aufnahme von Poltern im Wald, die Daten werden dann an die zentrale Datenverwaltungseinheit überspielt. Die Landesforstverwaltung Baden-Württemberg plante diese Schnittstelle durch Anschaffung neuer Datenerfassungssysteme und GPS-Systeme zu verbessern. Mit Hilfe einer zeitnahen Polterverwaltung ergibt sich sowohl für den liefernden Forstbetrieb wie auch für die abnehmende Holzindustrie ein zeitnahe und präziser Überblick über die Lagersituation in einem gegebenen Nutzungsgebiet.

## **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Nach Etablierung der GIS-gestützten Datenerfassung in der LFV Baden-Württemberg stehen verschiedene, am Markt verfügbare Komponenten für satellitengestützte Ortungs- und Routingsysteme (= GPS-Geräte) zur Verfügung, die mit relativ geringem technischen und finanziellen Aufwand in die Holztransportlogistik integriert werden könnten. Für das Teilprojekt 2 „Allokation – Forest Warehouse und Logistik“ waren zwei Arbeitspakete geplant, die aufeinander aufbauten. Im ersten Paket wurde eine Literaturstudie zum Themenkomplex GPS-Einsatz im Forstbetrieb bzw. unter besonderer Betrachtung der Holzerntelogistik durchgeführt. Die anschließende Studie über den Praxiseinsatz beschaffter Geräte im Hinblick auf ihren Einsatz in der Holzbereitstellungskette und dort besonders unter dem Aspekt eines Poltermanagements konnte innerhalb der vorgegebenen Laufzeit des Projektes nicht durchgeführt werden, da die Entwicklung der Schnittstelle zu Fokus 2000 erst mit Mitte 2008 erfolgreich beendet war und die notwendige Anschaffung der GPS-Geräte durch die Landesforstverwaltung Baden-Württemberg erst mit Ende des Jahres 2008 erfolgte.

## **1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfung**

Die miteinander kommunizierenden Systeme von mobilen Datenerfassungsgeräten im Wald und zentraler Datenverwaltung ermöglichen den Mitarbeitern und Kunden der LFV einen einfacheren und schnelleren Zugriff auf Geodaten und stellen gleichzeitig eine effiziente Unterstützung der betrieblichen Aufgaben sicher. Die Schnittstelle zwischen beiden Systemen wird in der betriebseigenen Software der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg erstmalig exemplarisch realisiert werden. Eine Verknüpfung der GIS-gestützten Geodienste mit GPS-Geräten (Global Positioning System) führt zu einer erheblichen Verbesserung der betriebsinternen Abläufe, z.B. im Bereich der Einsatz- und Transportlogistik von Forstmaschinen und Rohholztransporten oder in der Beschleunigung von Abläufen entlang der Produktionskette. Zudem bietet ein verbesserter Warenfluss Zeitersparnisse bei Holztransportunternehmen, Forstbetrieben und der Säge- und Holzindustrie, die zu Kosteneinsparungen z.B. durch eine höhere Anzahl von Frachten je Tag oder eine geringere Kapitalbindung führen. Die erreichten Zeitersparnisse hätten darüber hinaus zum Vorteil, dass eine Belieferung von Säge- und Papierwerken mit frischem Rohstoff erfolgt. Schließlich ermöglicht die verknüpfte Anwendung von GIS und GPS eine Erhöhung der Prozessqualität im Sinne eines Supply-Chain-Managements.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das Informatikzentrum Landesverwaltung Baden-Württemberg (IZLBW), Benutzerservice Forsten ist maßgeblich verantwortlich für die Ausgestaltung der Schnittstelle zwischen mobilem Datenerfassungsgerät und Einspeisung der Daten in das zentrale Datenverwaltungsprogramm FOKUS 2000 und die Benutzerschulung für anzuschaffende MDE-Geräte.

## **2 Eingehende Darstellung**

### **2.1 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans**

Mit Hilfe einer zeitnahen Polterverwaltung erhalten sowohl der liefernde Forstbetrieb wie auch die abnehmende Holzindustrie einen zeitnahen und präzisen Überblick über die Lagersituation in einem gegebenen Nutzungsgebiet. Dies umfasst die geographische Lage der Polter (ermittelt durch GPS und gespeichert im forstlichen Geländeinformationssystem) und eine Verknüpfung mit den Routinen der Abfuhrlogistik (zeitnahes „Ausbucher“ der Polter aus der Bestandesdatenbank, sobald der Transport erfolgt). Nur durch eine zeitnahe Polterverwaltung ist es möglich, die Vorteile des GIS /GPS-gestützten automatischen Routings zu den jeweils noch verbliebenen Holzlagerplätzen und –poltern auszunutzen.

Die Polter werden mit ihrer Identifikation, ihrer geographischen Position, Baumarten-, Massen- und Sortenzusammensetzung dem Forstlichen Informationssystem als Information zu Verfügung gestellt.

### **2.2 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen**

siehe Punkt 1.5

### **2.3 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

--

### **3 Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht**

#### **3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms**

Die Beteiligten an der Forst-Holz-Kette bewerten die Schnittstelle zwischen optimierter Holzbereitstellung im Wald und dem schnellstmöglichen Transport an die Verarbeitungsstelle als den in einer ersten Phase vordringlich zu verbessernden Teil der Logistikkette. Hier liegt ein relativ leicht zu realisierendes Zeit- und somit Kosteneinsparungspotenzial (HAUCK 2004).

Die am Markt verfügbaren Komponenten für satellitengestützte Ortungs- und Routingsysteme können mit relativ geringem technischen und finanziellen Aufwand auf den Einsatz in der Transportlogistik Wald/Holz auf einander abgestimmt werden (STRITTMATTER 2004). Ziel ist dabei ein verbesserter Warenfluss, um Zeitersparnisse bei den Holztransportunternehmen, den Forstbetrieben und der Säge- und Holzindustrie zu erreichen (BODELSCHWINGH 2001, HUG 2004). Zudem kann die Qualität des eingeschlagenen Holzes durch verkürzte Lieferzeiträume erheblich verbessert werden, indem z.B. die Pilzinfektionsgefahr und die dadurch einhergehende Verblauung des Holzkörpers durch schnellen Einschnitt und Trocknung sinkt.

Die schnelle und umfassende Einführung eines GPS-gestützten Routingsystems bei den Holztransportunternehmen bedarf einer fundierten Erhebung der Einsparungspotentiale für alle Beteiligten, um die Investitionsplanung für die Anschaffung dieser Systeme argumentativ und konstruktiv voranzutreiben.

#### **3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen**

##### **3.2.1 Literaturstudie**

Seit Anfang der 90er Jahre wurden zahlreiche Untersuchungen über einen Einsatz der GPS – Technologie (Global Positioning System) im Forstbetrieb durchgeführt. Seitdem liegen vielseitigste Erfahrungen und Erkenntnisse für den praktischen Einsatz von GPS sowie der auf dem Markt angebotenen Empfängern vor. Generell

können die GPS-Einsatzmöglichkeiten im Forstbetrieb in 3 Kategorien eingeteilt werden:

**GIS + GPS (=Forstbetrieb)**

- Einmessen von Wegen, Sturmflächen, Polterplätzen, Biotopen, Rückegassen, Zäunen
- Waldinventuren
- Logistik / Holzbereitstellung

### **3.2.2 Ergebnisse einer Studie zur Optimierung der Holzbereitstellungskette durch den Einsatz von GPS auf Revierebene am Beispiel eines modernen Poltermanagements**

#### **3.2.3 Grundlegende Fragestellungen zu Versuchsbeginn**

Zahlreiche Landesforstverwaltungen planen durch die Einführung beziehungsweise Nutzung eines so genannten Poltermanagements ihre Holzbereitstellungskette zu optimieren. Durch die exakte digitale Erfassung der Holzpolter an der Waldstraße mittels GPS-Empfänger können unter Nutzung moderner Kommunikationstechniken, wie E-mail, einerseits Informationsflüsse und andererseits die einzelnen Arbeitsschritte zwischen den unterschiedlichen Akteuren der Holzerntekette beschleunigt werden.

Die Einführung eines Poltermanagements bedarf zuvor einer umfassenden Untersuchung im Hinblick auf den praktischen Einsatz von GPS-Geräten auf Revierebene. Mit der Entscheidung für ein GPS-gestütztes Poltermanagement geht die Klärung folgender Fragen einher:

- Welche GPS-Empfänger stehen derzeit auf dem Markt zur Verfügung?
- Wie exakt ist die Positionsbestimmung?
- Welcher GPS-Empfänger ist unter dem Gesichtspunkt eines optimalen Kosten-Leistungs-Verhältnis für die Landesforstverwaltungen zum Zwecke des Poltermanagements zu empfehlen?

### 3.2.4 GPS Empfangssysteme

Am Markt sind derzeit GPS-Empfangssysteme (GPS) verfügbar, die drei verschiedenen Klassen zugeordnet werden können: low-cost oder Handheld GPS, GIS-Datenerfassungsempfänger und geodätische Empfänger (vgl. Tab. 1).

Empfänger-klasse	Genutztes Signal	Genauigkeit/ Echtzeitfähigkeit	Besonderheiten	Anwendung
low-cost	<b>Code oder phasengeglätteter Code, eine Frequenz</b>	<b>1 –10m / ja</b>	<b>Navigationsfunktionen</b>	<b>Massenmarkt, Navigation Tourismus</b>
GIS	<b>phasengeglätteter Code, eine Frequenz</b>	<b>0,5 – 3m / ja</b>	<b>Attributierung der Messdaten im Felde</b>	<b>Geo-Datenerfassung für GIS</b>
geodätisch	<b>Code und Phase, eine oder zwei Frequenzen</b>	<b>0,001 – 0,1m / zum Teil</b>	<b>Post-Processing Software für hohe Genauigkeiten</b>	<b>Geodäsie, präzise kinematische Positionsbestimmung</b>

**Tabelle 1: Übersicht über verschiedene GPS-Empfängerklassen**

Die höchste Genauigkeit in der Bestimmung einer Position (0,001 bis 0,1m) bieten geodätische GPS-Empfänger. Aufgrund ihrer hohen Anschaffungskosten (>10.000 €) kommen sie jedoch nicht für einen Einsatz auf Revierebene in Betracht. Geodätische GPS-Empfänger verfügen über den Vorteil, dass sie Signale auch von anderen Satellitennavigationssystemen wie GLONASS empfangen können und dadurch eine erhöhte Verfügbarkeit und Zuverlässigkeit in der Bestimmung von Positionen aufweisen.

Mit einem Genauigkeitsbereich von 0,5 – 3m zur Bestimmung einer Position erlauben GIS-Datenerfassungsgeräte eine grobe Aufnahme von Rückegassen. Ferner ermöglichen diese Geräte die Attribution der Daten bereits vor Ort im Wald und bieten zum Teil darüber hinaus beispielsweise in der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg eine Anbindung an das Forstliche Geoinformationssystem (FoGIS).

Aufgrund der ebenfalls hohen Beschaffungskosten (zwischen 3.000 und 5.000 €) kommt eine solche Geräteanschaffung für jedes Revier weniger in Frage.

Die Genauigkeit von Low-Cost GPS-Systemen zur Bestimmung von Positionen bewegt sich zwischen 1m und 10m. Für die Ermittlung von Holzpoltern scheint diese Genauigkeit ausreichend zu sein, da sich Holzpolter i.d.R. an ganzjährig befahrbaren Forstwegen befinden. Im Hinblick auf die notwendigen Anschaffungskosten liegen diese Geräte in einem Preissegment zwischen 200 € und 1.200 €.

Innerhalb der Gruppe der Low-Cost GPS-Empfänger ist eine Differenzierung nach ihrer Funktionalität möglich. Generell kann zwischen Empfängern mit oder ohne Kartendarstellung unterschieden werden. Daneben verfügen einige Systeme über einen integrierten Kompass sowie/oder über ein Barometer. Letztere ermöglichen eine Höhenbestimmung unabhängig vom GPS, wodurch eine Positionsbestimmung nur mit 3 Satelliten möglich ist. Ein im GPS-Empfänger integrierter Kompass ermöglicht dagegen eine GPS-unabhängige Orientierung. Dies erlaubt die Aufnahme von Objekten, bei denen eine Koordinatenerfassung mittels GPS nicht gegeben ist. Schließlich ist die Kombination von GSM-Mobiltelefon mit GPS-Empfängern zu erwähnen.

<b>Funktional- klasse</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>Empfängertyp</b>	<b>Standard- navigations -Empfänger</b>	<b>Zusätzliche Sensoren wie Barometer und / oder Kompass</b>	<b>Zusätzlich Karten- darstellung</b>	<b>Zusätzliche Sensoren und Kartendarst ellung</b>	<b>Kombinatio n mit GSM- Telefon (mit oder ohne Kartendarst ellung)</b>
<b>Preisspanne [€]</b>	<b>100 - 200</b>	<b>200 - 500</b>	<b>300 - 500</b>	<b>400 - 600</b>	<b>500 - 1.200</b>

**Tabelle 2: Funktionalklassen für Low-Cost GPS-Empfänger**

Ein Einsatz von GPS-Empfängern bei der Holzaufnahme bedingt, dass der Revierleiter zwei Geräte mit sich führen muss. Die mit Hilfe des GPS-Empfängers ermittelten Positionskoordinaten von Holzpoltern werden dann vor der eigentlichen

Holzaufnahme in das Datenerfassungsgerät (z.B. PSION) händisch eingegeben. Bis GPS-Empfänger in die mobilen Datenerfassungsgeräte integriert sind, ist der händische Eintrag der Positionskordinaten in das System notwendig.

### 3.2.5. Positionsbestimmung

Die Beurteilung der Qualität in der Positionsbestimmung der GPS-Empfänger wurde unter drei verschiedenen Situationen, wie sie für Baden-Württemberg repräsentativ sind, vorgenommen. So fand eine Bestimmung des Standortes auf einem Parkplatz, einem von Laubholzkronen dicht überschirmten Waldweg in der Ebene sowie auf einem nordexponierten Weg in Hanglage mit lichter Nadelwald-Überschirmung statt.

Die Bewertung der GPS-Empfänger erfolgte im Hinblick auf ihre Positionsbestimmung anhand folgender drei Kriterien:

- Verfügbarkeit (Anzahl Satelliten zur Bestimmung der Position),
- Zuverlässigkeit und
- Genauigkeit.

Allgemein ist die Bestimmung der Position von der Anzahl [n] zur Verfügung stehender Satelliten abhängig. Mit dem Aspekt "**Verfügbarkeit**" wurde untersucht, ob die in einem 10 Minuten Intervall erzeugten Positionslösungen über der vorgegebenen Positionsbestimmungsrate (Anzahl,  $n_{\text{Soll}}$ ) liegen. Werden in einem Intervall weniger Positionslösungen ( $n_{\text{Mess}}$ ) aufgezeichnet, so ist die Verfügbarkeit reduziert:

$$V = \frac{n_{\text{Mess}}}{n_{\text{Soll}}} \cdot 100 \%$$

Neben der Verfügbarkeit wurde anhand der erzeugten Positionsbestimmungen eine Beurteilung der **Zuverlässigkeit** über die Anzahl ( $n_{3\text{Sat}}$ ) von Lösungen mit einer Satellitenanzahl kleiner drei und über die Anzahl ( $n_{\text{Ausr.}}$ ) von Ausreißern in der Positionsbestimmung vorgenommen.

$$Z = \frac{n_{\text{Mess}} - n_{3\text{Sat}} - n_{\text{Ausr.}}}{n_{\text{Messl}}} \cdot 100 \% \quad \text{mit} \quad n = n_{\text{Mess}} - n_{3\text{Sat}} - n_{\text{Ausr.}}$$

Für eine präzise geodätische GPS-Vermessung bzw. Positionsbestimmung sind mindestens 4 Satelliten erforderlich, um die Lage und Höhe sowie einen Uhrfehler aus den Satellitensignalen zu bestimmen. Die in der vorliegenden Untersuchung verwendeten Low-Cost GPS-Empfänger ermitteln die Lagekoordinaten auch anhand von drei Satelliten, wobei unter diesen Voraussetzungen der Parameter Höhe nicht geschätzt, sondern aufgrund vorheriger Messungen festgehalten oder mit Hilfe eines integrierten Barometers bestimmt wird. Positionsangaben, die auf weniger als drei Satelliten beruhen, können keine aktuelle und genaue Positionsbestimmung durchführen, weshalb diese Angaben aufgrund mangelnder Zuverlässigkeit aus der Beurteilung der Genauigkeit ausgeschlossen wurden.

In der vorliegenden Untersuchung werden Messabweichungen von der Sollkoordinate bzw. vom Mittelwert von  $> 20$  m als Mess-Ausreißer betrachtet, da diese Abweichung nicht mehr dem für die eingesetzten Empfänger angegebenen Genauigkeitsbereich entsprechen.

Die **Genauigkeit** der Positionsbestimmung wurde anhand des HELMERTschen Punktfehlers vorgenommen, der ein Maß für die absolute Lagerichtigkeit der ermittelten Position ist. Aus den beiden Standardabweichungen der bestimmten Koordinaten R und H wird dieser folgendermaßen berechnet:

$$s_R = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (R_i - R_{\text{Soll}})^2}{n}} \quad \text{und} \quad s_H = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (H_i - H_{\text{Soll}})^2}{n}} \quad \begin{array}{l} R : \text{Rechtswert, Gauß - Krüger} \\ H : \text{Hochwert, Gauß - Krüger} \end{array}$$

Ziel der Untersuchung war die Ermittlung des leistungsstärksten GPS-Empfängers im Hinblick auf die drei oben genannten Beurteilungskriterien. Dazu wurden unterschiedliche Testszenarien (Grad der Überschilderung, Hanglage) gewählt, um eventuell auftretende Leistungsunterschiede feststellen zu können.

### 3.2.6 GPS-Empfänger

Hintergrund der vorliegenden Untersuchung ist der Einsatz von GPS-Empfängern auf Revierebene zur Bestimmung der Position von Holzpoltern im Wald. Neben Fragen der Genauigkeit und Zuverlässigkeit ist zu klären, ob mit GPS-Geräten aus dem Low-Cost – Segment eine kostengünstige Positionsbestimmung mit ausreichender Genauigkeit möglich ist.

Insgesamt wurden 5 verschiedene Geräte getestet, deren Anschaffungspreis zwischen 240,- € und 1.200,- € liegt. Bei den Geräten handelt es sich um folgende:

					
	<b>GARMIN</b> <b>eTrex</b>	<b>MAGELLAN</b> <b>Sporttrak</b>	<b>SILVA</b> <b>MultiNavi- gator</b>	<b>MAGELLAN</b> <b>Meridian (PI)</b>	<b>GERMAN</b> <b>NavTalk</b>
<b>Listenpreis (ca.)</b>	<b>120-160 €</b>	<b>190-220 €</b>	<b>450-500 €</b>	<b>500 €</b>	<b>600 €</b>
<b>Besonderheiten, Zusatzfunktio- nen</b>	-	-	<b>Kompass-, Barometer -funktion</b>	<b>Kartendar- stellung, Kompass- und Barometer- funktion</b>	<b>Kartenda r- stellung, GSM- Tele- fon, Geführte Straßen- navigatio n über Sprach-</b>

---

					<b>eingabe</b>
--	--	--	--	--	----------------

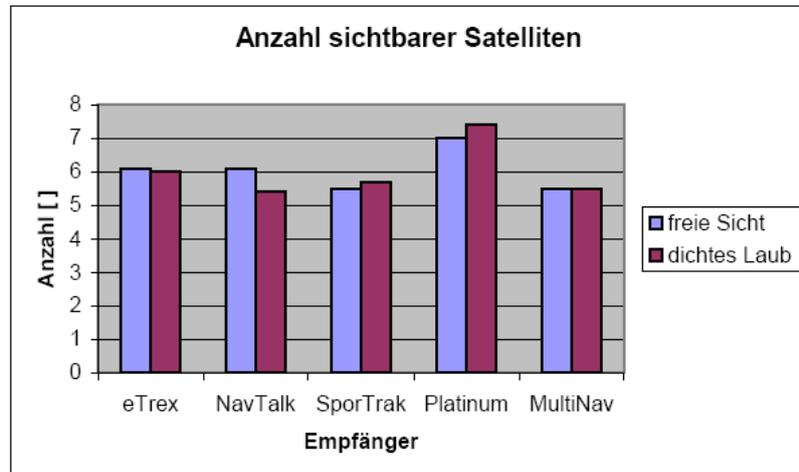
### **Tabelle 3: Übersicht der getesteten Geräte**

Auf eine ausführliche Darstellung der technischen Informationen zu den jeweiligen Geräten wird an dieser Stelle verzichtet und auf die Übersicht im Anhang 1 verwiesen.

### 3.2.7 Ergebnisse

#### Verfügbarkeit

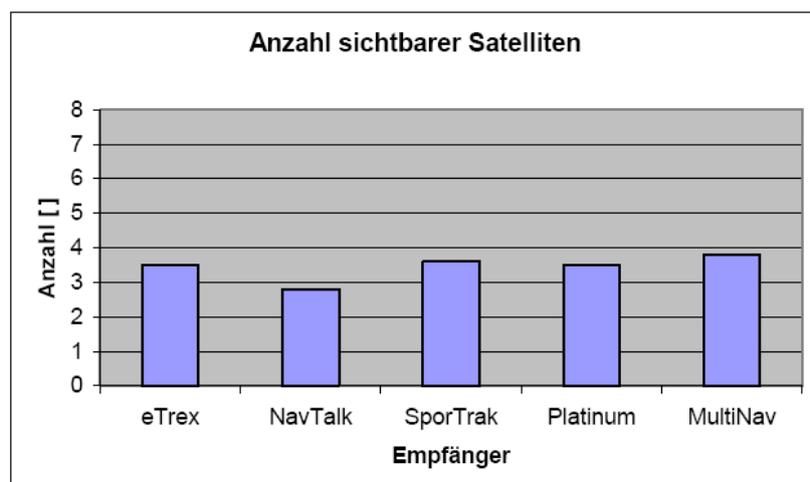
Grundvoraussetzung für eine exakte Bestimmung von Positionen mit Hilfe von GPS-Empfängern ist die Anzahl von Satelliten. Die Ergebnisse der Untersuchung zeigen, dass bei allen drei Testsszenarien für eine Positionsbestimmung eine ausreichende Anzahl von Satelliten zur Verfügung stand. Eine sehr ähnliche Zahl von verfügbaren



**Abbildung 1: Durchschnittliche Anzahl von zur Verfügung stehenden Satelliten zur Bestimmung der Position auf einem Parkplatz (freie Sicht) und auf einem Waldweg mit dichtem Kronenüberhang**

Satelliten konnte für die Testbedingungen "freie Sicht" und "von Kronen überdachter Waldweg in der Ebene" festgestellt werden. Abbildung 1 gibt die mittlere Anzahl von Satelliten für die beiden Testszenarien wieder.

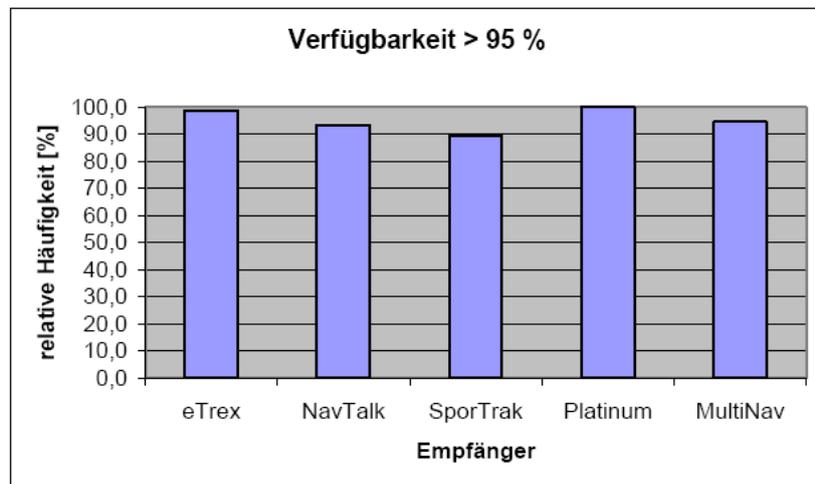
Die Ergebnisse für Messungen am Hang zeigen eine deutlich geringere Anzahl von empfangenen Satelliten auf (Abb. 2). Dies beruht darauf, dass Hänge einen Teil der sonst zur Verfügung stehenden Satelliten abschatten.



**Abbildung 2: Satellitenempfang am Nordhang**

Diese Tatsache ist insbesondere beim NavTalk mit einer mittleren Satellitenanzahl < 3 zu beobachten.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass unter allen Testszenarien der MAGELLAN Meridian Platinum die meisten Satelliten empfängt. Ebenfalls gute Ergebnisse liegen für den GARMIN eTrex vor. Die wenigsten Satelliten empfängt der MAGELLAN SporTrak, weshalb mit diesem Gerät die wenigsten Positionsbestimmungen realisiert werden konnten. Im Mittelfeld bewegen sich der GARMIN NavTalk und



der SILVA Multi-Navigator. Die

**Abbildung 3: Verfügbarkeit aller Punktmessungen**

dargestellten Ergebnisse spiegeln ebenfalls die Resultate über die relative Häufigkeit von gemessenen Punkten in einem 10 Minuten Intervall wieder. So lag bei einem 10 minütigen Messintervall zur Bestimmung der Position die Verfügbarkeit aller Punktmessungen beim GARMIN eTrex und dem MAGELLAN Meridian Platinum bei über 95% (Abb. 3). Das bedeutet, dass während der Messung für maximal 30 Sekunden eine Punktmessung nicht möglich war. Die geringste Verfügbarkeit wurde beim MAGELLAN SporTrak mit 90%iger Verfügbarkeit festgestellt.

Bei GPS-Empfängern, die über einen integrierten Kompass verfügen (MAGELLAN Meridian Platinum und SILVA Multi-Navigator), können einzelne Punkte unter Verwendung des Kompasses und einer Entfernungsinformation polar aufgenommen werden, sofern eine automatische Bestimmung nicht möglich ist.

### Zuverlässigkeit

Die schwierige Empfangssituation in der Hanglage beeinflusst in einem gewissen Maße die Zuverlässigkeit der Positionsbestimmung. Ein Indikator für eine verminderte Zuverlässigkeit stellt beispielsweise der HDOP-Wert (= Horizontal Dilution of Precision - Wert) dar, mit dessen Hilfe sich die Genauigkeit der horizontalen 2D-Position beschreiben lässt.

Die besten HDOP-Werte weisen alle GPS-Empfänger bei freier Sicht auf, wobei die beiden GPS-Empfänger der Firma MAGELLAN die schlechtesten Werte zeigen. Bei den beiden anderen Testbedingungen ist eine eindeutige Aussage zur generellen Zuverlässigkeit nicht möglich. Es war stellenweise zu beobachten, dass eine herabgesetzte Zuverlässigkeit bei allen Systemen auftrat, die jedoch keine Systematik erkennen lies.

Die Ergebnisse der einzelnen GPS-Empfänger im Hinblick auf ihre Zuverlässigkeit stellen sich insgesamt wie folgt dar: Mit 97,9%iger Zuverlässigkeit schnitt der GARMIN eTrex am besten ab. Einen Zuverlässigkeitswert von 93% wiesen jeweils der MAGELLAN Meridian Platinum (93,5%), der SILVA Multi-Navigator (93,6%) und der GARMIN NavTalk (93,1%) ab. Die geringste Zuverlässigkeit war mit 71,5% beim MAGELLAN SporTrak festzustellen. Die geringeren Zuverlässigkeiten der beiden MAGELLAN und des SILVA MultiNavigator war auf grobe Ausreißer in der Positionsbestimmung zurückzuführen. Während der Tests waren mindestens 3 Satelliten zur Positionsbestimmung vorhanden. Aus diesem Grund ist eine mangelnde Zuverlässigkeit infolge fehlender Satelliten auszuschließen. Zudem würde dies auf dem Display der GPS-Empfänger erkennbar sein.

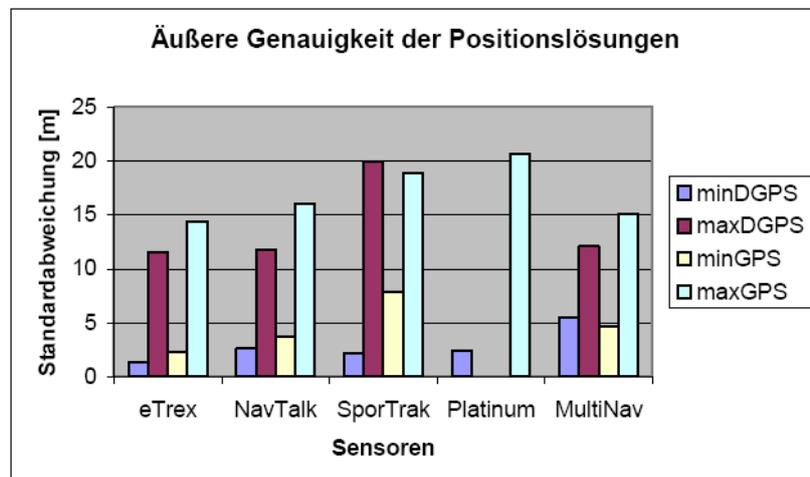
Eine Erhöhung der Zuverlässigkeit ist durch die Berechnung des Mittelwertes aus allen ermittelten Positionsergebnissen eines Messintervalls möglich. Dies lässt erwarten, dass der berechnete Mittelwert weniger vom Sollwert abweicht, da die Wirkung von Ausreißern auf das Gesamtergebnis reduziert wird. Die Ergebnisse für die Intervallmessungen zeigten für die MAGELLAN Modelle (SporTrak und Meridian Platinum), dass aufgrund von z.T. systematischen Messabweichungen vom Sollwert auch bei längeren Messperioden keine höhere Zuverlässigkeit erreicht wurde. Hingegen konnte diese bei einer längeren Positionsbestimmungsdauer (60 bis 120 Sekunden) bei den GARMIN Modellen (eTrex, NavTalk) festgestellt werden. Gleiches wurde beim SILVA Multi-Navigator ermittelt (120 bis 300 Sekunden). Für die drei letztgenannten GPS-Empfänger kann daher gesagt werden, dass bei einer aus 120 bzw. 300 Sekunden gemittelten Positionsbestimmung eine Zuverlässigkeit von 100% im Test erreicht wurde. In diesem Zusammenhang ist darauf hinzuweisen, dass zum Versuchszeitpunkt beim SILVA Multi-Navigator als auch beim GARMIN eTrex eine Mittlungsfunktion empfängerseitig nicht zur Verfügung stand. Zur Sicherstellung der

verbesserten Zuverlässigkeit ist daher eine Nachbereitung der Positionsmessungen notwendig.

## Genauigkeit

Die Ergebnisse über die Genauigkeit der Positionslösungen zeigen, dass bei allen Messungen keine homogenen Genauigkeiten nachgewiesen werden konnten. Das bedeutet, dass die festgestellten Unterschiede in der Genauigkeit weder durch die unterschiedlichen Testszenarien noch durch Genauigkeitssteigerungen durch den Einsatz von differenziellen Korrekturen erklärt werden können.

Insgesamt zeigen die Ergebnisse aller Empfänger für die jeweils minimale und maximale Standardabweichung der 75 Punktmessungen mit DGPS und GPS nahezu die gleichen Werte auf (Abb. 4).



Auffällig war beim SILVA Multi-Navigator, dass die minimale Standardabweichung aus der DGPS-

**Abbildung 4: Minimale und maximale Standardabweichung aller Punktmessungen jeden Empfängers getrennt nach DGPS und GPS**

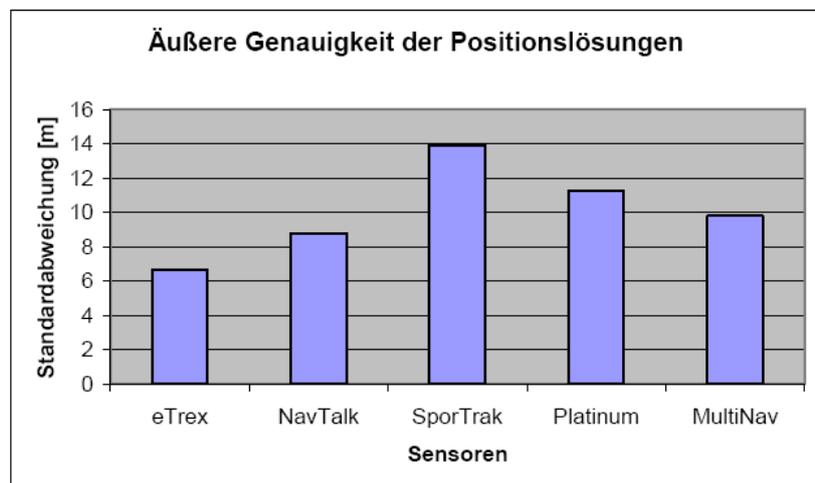
Messung größer ist als die der GPS-Messung. Insgesamt waren ähnliche Extremwerte für die Genauigkeiten bei den absoluten als auch bei den differentiellen Messungen ermittelt worden.

Aufgrund der EGNOS-Fähigkeit des MAGELLAN Meridian Platins und des MAGELLAN SporTrak können differenzielle Lösungen über SAPOS und EGNOS nicht anhand der Ausgabeergebnisse am Display unterschieden werden. Da die differentielle Korrektur im NMEA-String ebenso wie das herkömmliche differentielle

GPS mit einer "2" beim Status der Positionslösung gekennzeichnet wird, ist keine Unterscheidung möglich. Der Anzeige der beiden Empfänger zur Folge werden allerdings SAPOS Daten den EGNOS Korrekturen vorgezogen. Es kann davon ausgegangen werden, dass differentiell gemessene Punkte auch bei den MAGELLAN Geräten Positionen mit SAPOS Korrekturen darstellen, während bei absoluten Positionsbestimmungen das EGNOS Korrekturdatensignal verwendet worden sein muss. Während 39 absoluten Messungen hat beispielsweise der MAGELLAN Meridian Platinum 30 mal differentielle Lösungen mit EGNOS Korrekturen erzeugt, während beim MAGELLAN SporTrak nur dreimal differentielle Lösungen zustande kamen.

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen ferner, dass der Empfang von DGPS Korrekturdaten unter bestimmten Situationen nur teilweise oder gar nicht möglich ist. So konnten beispielsweise keine Korrekturdaten am Nordhang unter dichter Beschirmung empfangen werden. Unter "frei Sicht"-Verhältnissen wiesen die beiden GARMIN Empfänger sehr gute und homogene Genauigkeiten auf. Auch das Genauigkeitsniveau des MAGELLAN Meridian Platinum und des SILVA Multi-Navigator sind unter diesen Testverhältnissen besser. Für den MAGELLAN SporTrak war dies nicht erkennbar.

Insgesamt lassen sich die Ergebnisse über die mittlere Genauigkeit aller Positionsbestimmungen folgendermaßen zusammenfassen: Der GARMIN eTrex ist deutlich am genauesten (Abb. 5). Die beiden GPS-Empfänger der Firma MAGELLAN am ungenauesten. Der GARMIN NavTalk sowie der SILVA Multi-Navigator befinden sich im Mittelfeld.



**Abbildung 5: Mittlere Standardabweichung [m] (äußere Genauigkeit)**

### **3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

--

### **3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

--

### **3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer**

--

### **3.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

In der Durchführung des Projektes kam es zu folgenden Abweichungen vom ursprünglichen Zeit- und Ausgabenplan des Teilprojektes TP2 an der FVA Baden-Württemberg: Arbeitspaket 1 – Erstellung einer Literaturstudie und Evaluierung potentieller Erfassungssysteme wurde fristgerecht zum Ende 2006 abgeschlossen, Arbeitspaket 2 – Bewertung der Geräte im Praxiseinsatz in Kombination mit der zentralen Datenverwaltung konnte nicht bearbeitet werden. Einerseits wurden die für die Untersuchung benötigten mobilen Datenerfassungsgeräte erst nach Ende der geplanten Projektdauer zum Mitte 2008 von der LFV Baden-Württemberg angeschafft, zum anderen war die Schnittstelle zum Einlesen der Daten in Fokus 2000 innerhalb der Projektbearbeitungszeit noch nicht abschließend entwickelt, so dass in der verbliebenen Projektzeit die Anwendung dieser Schnittstelle nicht in der Praxis getestet werden. Die Verausgabung von Personal- und Sachmitteln erfolgt somit nur für Arbeitspaket 1. Es wurde beantragt, die verbliebenen Personalmittel im Zuge einer kostenneutralen Projektverlängerung in TP1 – „Ressource – Rationelle und präzise Bestandserfassung“ sowie TP3 – „Produktlinie Nadelstammholz – Automatisierte Erkennung und Bewertung innerer Holzeigenschaften“ wegen dort anfallendem Mehrbedarf verwenden zu dürfen. Diesem Antrag wurde von Seiten des Projektträgers zugestimmt.

#### 4 Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Forest Warehouse und Logistik  im Verbundprojekt „MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung“		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Sauter, Udo Hans Burian, Bertril Brüchert, Franka	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2008	
	6. Veröffentlichungsdatum	
	7. Form der Publikation Schlussbericht	
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) Abteilung Waldnutzung Wonnhaldestr. 4 79100 Freiburg	9. Ber. Nr. Durchführende Institution	
	10. Förderkennzeichen 0330616B	
	11. Seitenzahl 35	
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	für	
	13. Literaturangaben 19	
	14. Tabellen 3	
	15. Abbildungen 5	
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 53170 Bonn		

## 18. Kurzfassung

Die Beteiligten an der Forst-Holz-Kette bewerten die Schnittstelle zwischen optimierter Holzbereitstellung im Wald und dem schnellstmöglichen Transport an die Verarbeitungsstelle als den in einer ersten Phase vordringlich zu verbessernden Teil der Logistikkette. Hier liegt ein relativ leicht zu realisierendes Zeit- und somit Kosteneinsparungspotenzial (Hauck 2004).

Die am Markt verfügbaren Komponenten für satellitengestützte Ortungs- und Routingsysteme können mit relativ geringem technischen und finanziellen Aufwand auf den Einsatz in der Transportlogistik Wald/Holz auf einander abgestimmt werden (Strittmatter 2004). Ziel ist dabei ein verbesserter Warenfluss, um Zeitersparnisse bei den Holztransportunternehmen, den Forstbetrieben und der Säge- und Holzindustrie zu erreichen (Bodelschwingh 2001, Hug 2004). Zudem kann die Qualität des eingeschlagenen Holzes durch verkürzte Lieferzeiträume erheblich verbessert werden, indem z.B. die Pilzinfektionsgefahr durch schnellen Einschnitt und Trocknung sinkt.

Die schnelle und umfassende Einführung eines GPS-gestützten Routingsystems bei den Holztransportunternehmen bedarf einer fundierten Erhebung der Einsparungspotentiale für alle Beteiligten, um die Investitionsplanung für die Anschaffung dieser Systeme argumentativ und konstruktiv voranzutreiben.

Die Verwendung des Globalen Positionierungssystems GPS als Mess- und Positionierungsverfahren für forstliche Zwecke ist mit den untersuchten LowCost-Empfängern grundsätzlich möglich. Die Anforderungen an die Genauigkeit und Zuverlässigkeit einer Polterpositionierung (+/- 10m) werden von allen Geräten, bis auf den MAGELLAN Sportrak, weitgehend erfüllt.

Unter den getesteten Geräten war der GARMIN eTrex im Hinblick auf Positionsbestimmungseigenschaften Verfügbarkeit, Zuverlässigkeit und Genauigkeit zur Erfassung von Rundholzpoltern am Besten. Mit einer mittleren Genauigkeit von rund 7m und einer Zuverlässigkeit von 98% generierte der GARMIN eTrex die besten und zuverlässigsten Messwerte. Als Basisgerät verfügt es aber über keine besonderen Zusatzfunktionen. In der nächst höheren Preiskategorie und Ausstattungsklasse schneidet der MAGELLAN Platinum Meridian vergleichsweise gut ab. Jedoch ist der MAGELLAN mehr als doppelt so teuer wie der GARMIN eTrex, da er die Besonderheiten Kartendarstellung, Kompass- und Barometerfunktion besitzt.

Mangels IuK-technischer Infrastruktur (PSION-Schnittstelle, Revier-PC, FOKUS-Auslesesoftware) war zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung eine automatische Übertragung der ermittelten GPS-Koordinaten ins mobile Datenerfassungsgerät PSION und später ins FOKUS nicht möglich. Bis zur Einrichtung der entsprechenden Infrastruktur bzw. Schnittstellen kommt nur die manuelle Übertragung der vom GPS-Empfänger ermittelten Polter-Koordinaten in das PSION in Frage. Als Alternative würde sich die Übertragung per GSM/GPS-Technik mit dem GARMIN NavTalk anbieten. Jedoch ist dies mit vergleichsweise hohen Anschaffungskosten verbunden, weshalb diese Lösung nicht empfohlen wird. Eine andere Möglichkeit die GPS-Koordinaten automatisiert zu ermitteln und weiterzuverarbeiten ist die Beschaffung von Revier-PCs. In diesem Fall könnten die erfassten GPS-Koordinaten und Holzpolterdaten (PSION) im Revier später auf dem PC zusammengeführt werden.

Wegen der vergleichsweise geringen Beschaffungs- und Unterhaltungskosten für LowCost-GPS-Empfänger bleiben die Investitionsrisiken auch bei einer größeren Stückzahl an Geräten kalkulierbar. Eine Beschaffung des GARMIN eTrex wäre aufgrund des günstigen Preis-Leistungsverhältnisses auch für einen kürzeren Übergangszeitraum bis zur Einführung eines mobilen Datenerfassungsgerätes mit integrierten GPS-Empfänger vertretbar. Die in der Literatur beschriebenen Zeitersparnisse zeigen, dass eine Geräteamortisierung in kürzester Zeit möglich ist.

## 19. Schlagwörter

Forst-Holz-Kette, GPS, IuK, Position, Poltermanagement

## 20. Verlag

## 21. Preis

## 5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Durchschnittliche Anzahl von zur Verfügung stehenden Satelliten zur Bestimmung der Position auf einem Parkplatz (freie Sicht) und auf einem Waldweg mit dichtem Kronenüberhang	225
Abbildung 2: Satellitenempfang am Nordhang	225
Abbildung 3: Verfügbarkeit aller Punktmessungen	226
Abbildung 4: Minimale und maximale Standardabweichung aller Punktmessungen jeden Empfängers getrennt nach DGPS und GPS	228
Abbildung 5: Mittlere Standardabweichung [m] (äußere Genauigkeit)	229

## 6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Übersicht über verschiedene GPS-Empfängerklassen	219
Tabelle 2: Funktionalklassen für Low-Cost GPS-Empfänger	220
Tabelle 3: Übersicht der getesteten Geräte	224

## 7 Literaturverzeichnis

BAUER, J., BODELSCHWINGH von, E., WARKOTSCH, W. (2005): „Potenziale einer effizienten Logistik nutzen“, Holzzentralblatt Nr. 86, S. 1163 f.

BAUMANN, T. (2003): „Untersuchung über verschiedene Methoden zur punktgenauen Positionsbestimmung und deren Rationalisierungspotentiale im operativen Forstbetrieb – Fallstudie am Beispiel der Holzbereitstellungskette“, Diplomarbeit am Institut für Forstbenutzung und forstliche Arbeitswissenschaft der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.

BODELSCHWINGH von, E., ZEISAK, M. (2001): „Bessere Logistik im Forst hilft Kosten senken“, Holzzentralblatt Nr. 66, S. 874.

BODELSCHWINGH von, E., BAUER, J. (2003): „Praxiseinsatz der Logistiksoftware GeoMail“, LWFaktuell Nr. 39, S. 19 – 22.

- BODELSCHWINGH von, E., BAUER, J., WARKOTSCH, W. (2005): „Impulse für die Mobilisierung von Rundholz im Kleinprivatwald“, AFZ – Der Wald Nr. 18, S. 955 - 958.
- CZAJA, J. HAMBERGER, J (2001): „Navigation und Einmessung mit DGPS im Wald“, AFZ – Der Wald Nr. 25, S. 1327 - 1330.
- ENGELS, F. (2001): „Anforderungen an ein GPS-Gerät beim Einsatz im forstlichen Versuchswesen“, AFZ – Der Wald Nr. 10, S. 513 - 516.
- FRITZ, R., GAWEHN, P. (2001): „Vermessung von Waldmessstationen mit DGPS“, AFZ – Der Wald Nr. 10, S. 518 - 521.
- HAUSKNECHT, E., HÖFLE, H., RÖTTGEN, Th. (2001): „Einsatz von navigationssystemen für Holztransporte im Wald“ AFZ – Der Wald Nr. 3, S. 108 f.
- HUG, J. (2002): „Optimierung von Geschäftsprozessen in der Forstwirtschaft durch den Einsatz von Informationstechnologie : am Beispiel der Holzbereitstellung auf Revierebene“, Dissertation im Institut für Forstbenutzung an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br.
- KRAFT, D. (2000): „Die Prozesskette Holzernte: Leistungs- und Wertschöpfungsprozess aus der Sicht eines Forstunternehmens“, Forst und Holz Nr. 5, Jg. 55, S. 123 - 130.
- KETTEMANN, R. (1995): „GPS und seine Anwendungsmöglichkeiten im Forstwesen“, AFZ – Der Wald Nr. 22, S. 1201 - 1203.
- KOCH, B., FRITZ, R., KURZMANN, R. (1998): „GPS zur Erfassung und Positionierung von Objekten im Wald“, AFZ – Der Wald Nr. 4, S. 167 f.
- LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN-WÜRTTEMBERG (2002): „Entwicklung von Konzepten zur Verbesserung der Holzbereitstellung – Grobkonzeption“, Bericht der Projektgruppe Holzbereitstellung, 88 S.
- LANDESFORSTVERWALTUNG BADEN-WÜRTTEMBERG (2003): „GPS-Einsatz auf Revierebene“, Projektabschlussbericht, 98 S.
- LANGHEIM, J. (1998): „Die Holzerntekette aus Sicht des Sägewerks“ Veranstaltungsbericht zum Vortrag beim 2. Forstlichen Unternehmertag am 12.02.1998 in München, FTI Nr. 4/5 S. 51 –55.

- STRITTMATTER, M., SCHWARZ, T., WIPPEL, J. (2005): Landesforstverwaltung Baden-Württemberg führt Poltermanagement ein“, AFZ – Der Wald Nr. 11, S. 585 - 586.
- THIEME, F. (1998): „GPS und GIS – Chancen für Forst- und Holzwirtschaft?!“, Forst & Technik Nr. 11, S. 10 - 12.
- WAGELAAR, R. OSTERTAG, L. (2005): „Effiziente und flexible Kartendarstellung“, AFZ – Der Wald Nr. 11, S. 579 - 581.

## 8 Anhang

<b>GPS- Gerätevergleich</b>					
Bezeichnung	GARMIN eTrex	MAGELLAN Sportrak	SILVA Multi Navigator	MAGELLAN Meridian (PI)	GARMIN NavTalk
Preis	<b>120 bis 160 €(ohne Zubehör)</b>	<b>190 bis 220 €(ohne Zubehör)</b>	<b>455 bis 500 €</b>	<b>ca. 500 €(ohne Zubehör)</b>	<b>ca. 600 €</b>
<b>Technische Details</b>					
Größe	<b>11 H x 5 B x 3 T cm</b>	<b>14,2 H x 5,6 B x 3,3 T cm</b>	<b>17,0 H x 6,1 B x 3 T cm</b>	<b>16,5 H x 7,5 B x 3,4 T cm</b>	<b>13,3 H x 5,1 B x 2,4 T cm</b>
Gewicht (mit Batterien)	<b>150 g</b>	<b>170 g</b>	<b>254 g</b>	<b>227 g</b>	<b>170 g</b>

Displaygröße und -Farbe	<b>5,4 x 2,7 cm, 4 Graustufen und Hintergrundbeleuchtung</b>	<b>5,1 x 2,5 cm, 2 stufige Hintergrundbeleuchtung</b>	<b>4,1 x 5,6 cm, 4 Graustufen mit Hintergrundbeleuchtung</b>	<b>4,5 x 5,6 cm, 4 Graustufen mit Hintergrundbeleuchtung</b>	<b>3,2 x 3,8 cm, 4 Graustufen mit Hintergrundbeleuchtung</b>
Displayauflösung	<b>LCD, 64 x 128 Pixel</b>	<b>LCD, 160 x 104 Pixel</b>	<b>LCD, ?</b>	<b>LCD, 120 x 160 Pixel</b>	<b>LCD, 132 x 160 Pixel</b>
Tastaturbeleuchtung	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>
Empfänger	<b>PhaseTrac12-Empfänger</b>	<b>12-Kanal Parallel-Empfänger</b>	<b>12-Kanal Parallel-Empfänger</b>	<b>12-Kanal Parallel-Empfänger</b>	<b>12-Kanal Parallel-Empfänger</b>
Kompatibilität	<b>WAAS, EGNOS</b>	<b>WAAS, EGNOS</b>	<b>WAAS, EGNOS</b>	<b>WAAS, EGNOS</b>	<b>WAAS, EGNOS</b>
Antenne	<b>GPS-Relaisantenne</b>	<b>Quadriflar Helix</b>	<b>Interne Patch-Antenne</b>	<b>Quadriflar Antenne</b>	<b>integrierte Antenne</b>
Positionsupdate	<b>1x pro sec</b>	<b>1x pro sec</b>	<b>1x pro sec</b>	<b>1x pro sec</b>	<b>1x pro sec</b>
Warmstart	<b>ca. 15 sec</b>	<b>&lt; 1 min</b>	<b>ca. 10 sec</b>	<b>ca. 15 sec</b>	<b>ca. 15 sec</b>

Kaltstart	ca. 45 sec	< 2 min	ca. 45 sec	ca. 1 min	ca. 45 sec
Gehäuse	wasserdicht nach IEC-529 IPX7	Gummiarmiertes Hartplastik, wasserdicht nach IEC-529 IPX7 und schwimmfähig	wasserdicht nach IEC-529 IPX7	wasserdicht nach IEC-529 IPX7, schwimmfähig	Kunststoff, silber
Batterien	2 AA Batterien	2 AA Batterien	2 AA Batterien	2 AA Batterien	Wiederaufladbarer Akku
Batterielaufzeit	bis zu 20 Stunden	14 Stunden (ohne Beleuchtung)	10 Stunden (Dauerbetrieb)	12 Stunden (Dauerbetrieb)	8 h Gesprächszeit (bei eingeschaltetem GPS reduzieren sich diese Zeiten entsprechend)
Interner Speicher	1 MB	1 MB	?	16 MB	16 MB

Genauigkeit	< 15 m	3 m	< 15 m, 1-5 m mit DGPS	3 m	< 15 m, 1-5 m mit DGPS
Arbeitstemperatur	-15°C bis +70°C	-10°C bis +60°C	-25° bis +70 °C	-10°C bis +60°C	-5°C bis +70°C
Schnittstellen	NMEA0183, RCTM 104 DGPS	NMEA0183, RCTM 104 DGPS	NMEA0183, RCTM 104 DGPS	NMEA0183, RCTM 104 DGPS, Nexus PP	NMEA0183, RCTM 104 DGPS
Features					
Koordinatensysteme	Lat/Lon, UTM/UPS, Gauß-Krüger, Maidenhead und weitere + Benutzerdefiniertes	Lat/Lon, UTM, britisches, schwedisches, deutsches (Gauß-Krüger), französisches und benutzerdefinierbares Kartengitter	Lat/Lon, UTM/UPS, weitere Systeme optional erhältlich	Lat/Lon, UTM, OSGB, MGRS, Netze: Schweiz, Irland, Finnland, Frankreich, Schweden, Deutschland	Lat/Lon, UTM/UPS, Maidenhead, MGRS, Loran TDs, benutzerdefiniertes und weitere Gitter
Wegpunkte	500	500	1000	500	500

Routen	<b>20 umkehrbare Routen mit bis zu 124 Wegepunkten</b>	<b>20 Routen mit bis zu 30 Wegpunkte</b>	<b>10 umkehrbare Routen mit je 100 Wegpunkte</b>	<b>20 umkehrbare Routen</b>	<b>20 manuelle Point-to-Point Routen mit jeweils bis zu 50 Punkten</b>
Trackpunkte	<b>max. 10000 Trackpunkte im aktiven Log</b>	<b>2000</b>	<b>5000</b>	<b>2000</b>	<b>4000 im Active Lock</b>
Trackback-Funktion (Zeichnet zurückgelegten Weg auf)	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>
Sprachgesteuerte Navigation	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>
Kompass	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>nein</b>
Barometer / Barograph	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>nein</b>
Autorouting	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>

Handy-Funktion	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
PDA-Funktion	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>
geeignet zur Offroad- Navigation (Handgerät)	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>	<b>ja</b>
Neoprenschutzhülle	<b>nein</b>	<b>nein</b>	<b>ja</b>	<b>nein</b>	<b>nein</b>



## **Begriffsdefinitionen**

### **DGPS**

Differentielles GPS. Relative Positionsbestimmung unter Nutzung einer Referenzstation, deren Koordinaten bekannt sind. An der Referenzstation ist folglich die Soll-Position bekannt und die Abweichung von dieser Soll-Position kann anhand aktueller GPS-Messungen bestimmt werden. Hiervon können Korrekturen abgeleitet werden, die in Echtzeit an einen zweiten Empfänger übermittelt werden. Aufgrund der übermittelten Korrekturen ergibt sich eine verbesserte Genauigkeit der Positionsbestimmung für den zweiten Empfänger (ca. 1-3m). In der Regel wird beim DGPS über Korrekturen gesprochen, die auf die Messung mittels Code basieren. Der Empfang der Korrekturdaten erfordert eine zusätzliche Kommunikationsmöglichkeit, wie ein Mobiltelefon oder einen 70 cm oder 2m Funk Empfänger.

### **EGNOS**

European Geostationary Navigation Overlay Service. Es handelt sich um einen DGPS Dienst auf Basis geostationärer Satelliten. Die Satelliten übermitteln die Korrekturen und können gleichzeitig als zusätzliche GPS-Satelliten genutzt werden, da sie GPS Kompatible Signale aussenden. Der Empfang der Korrekturdaten erfolgt am Empfänger über die GPS-Empfangsantenne; eine zusätzliche Kommunikationseinrichtung ist nicht erforderlich.

### **EPS**

Echtzeit-Positionierungs-Service. Im Rahmen von SAPOS ausgestrahlte Korrekturdaten auf dem Genauigkeitsniveau von DGPS.

### **GPS**

Global Positioning System. Amerikanisches globales Satelliten Navigationssystem, dass die Positionsbestimmung in Echtzeit unter Nutzung von 4 Satelliten und der Methode des räumlichen Rückwartsschnittes ermöglicht. Gemessen werden die um

den Uhrfehler beim GPS-Empfänger verfälschten Strecken zwischen dem Satelliten und dem GPS-Empfänger. In der Regel werden die Strecken unter Nutzung der aufmodulierten Codes (Genauigkeit: 1 – 10m) ermittelt. Differentielle Methoden ergeben eine Verbesserung der Positionsgenauigkeit.

## **HDOP**

Horizontal Dilution of Precision. Geometrisches Maß zur Beschreibung der Genauigkeit der horizontalen 2D-Position.

# Teilprojekt 3:

## Produktlinie Nadelstammholz: Automatisierte Erkennung und Bewertung von inneren Holzeigenschaften

Abteilung Waldnutzung

Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt  
Baden-Württemberg

## Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Abteilung Waldnutzung, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg	Förderkennzeichen: 0330616B
Vorhabenbezeichnung: MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung Teilprojekt 3: Produktlinie Nadelstammholz: Automatisierte Erkennung und Bewertung von inneren Holzeigenschaften  Rafael Baumgartner Franka Brüchert Udo Hans Sauter	
Laufzeit des Vorhabens: 1. September 2005 bis 31. Dezember 2008	
Berichtszeitraum: 1. September 2005 bis 31. Dezember 2008	

## **MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung**

### **Teilprojekt 3: Produktlinie Nadelstammholz: Automatisierte Erkennung und Bewertung von inneren Holzeigenschaften**

Rafael Baumgartner, Franka Brüchert, Udo Hans Sauter

Abteilung Waldnutzung, Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg

Freiburg, Juni 2009

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Kurze Darstellung des Teilvorhabens</b>	<b>249</b>
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	249
1.2	Vorraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	250
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	251
1.4	Wissenschaftliche und technische Anknüpfung	258
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	259
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>260</b>
2.1	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans	260
2.2	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	261
2.3	Erfolgte Veröffentlichungen	261
<b>3</b>	<b>Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht</b>	<b>262</b>
3.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	262
3.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen	262
3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	272
3.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	274
3.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)	274

---

3.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	275
<b>4</b>	<b>Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)</b>	<b>276</b>
<b>5</b>	<b>Abbildungsverzeichnis</b>	<b>278</b>
<b>6</b>	<b>Tabellenverzeichnis</b>	<b>279</b>
<b>7</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>279</b>

# 1 Kurze Darstellung des Teilvorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Nachhaltige und multifunktionale Forstwirtschaft führt zu einer verstärkten Nutzung der Ressource Holz. Bei dem Rohstoff Holz, der von Natur aus sehr inhomogen ist, kann eine optimierte Ressourcennutzung nur erreicht werden, wenn die innere Qualität des Rundholzes beim Eingang ins Sägewerk durch geeignete Technologien (wie z. B. Röntgentechnologie) erfasst werden und damit in den Optimierungsprozess eingebracht werden. So können Kundenwünsche befriedigt und eine optimale Rohstoffnutzung wahrgenommen werden. Die Röntgentechnologie, wie sie in anderen Bereichen der Materialprüfung eingesetzt wird, ermöglicht die Erkennung und genaue Lokalisierung von Holzmerkmalen. Dadurch kann Rundholz bereits vor Beginn der Bearbeitung qualitativ zugeordnet und hinsichtlich des bestmöglichen Endprodukts eingesetzt werden.

Durch solche Technologien kann der Rohstoffeinsatz von Rundholz erheblich optimiert werden, da zukünftig schon zu Beginn des Produktionsprozesses z.B. im Sägewerk entschieden werden kann, welches Produkt aus einem Stück Rundholz entstehen soll. Dies erlaubt effizienten Rohstoffeinsatz, vermeidet Einschnittsverluste und reduziert aufwändige Weiterverarbeitungskosten. Zudem kann den zunehmenden Anforderungen des Marktes nach homogenen und standardisierten Produkten entsprochen werden.

Die Holzverarbeitung ist im Regelfall ubiquitär und hat für die Struktur der ländlichen Räume eine sehr hohe Bedeutung. Durch den Einsatz solcher Technologien können Arbeitsplätze im ländlichen Raum gesichert und ökologische Materialien kundennah produziert werden. Soziale, ökologische und ökonomische Vorteile werden so besser miteinander verknüpft.

Holz ist ein nachwachsender, anisotroper Rohstoff, der sowohl innerhalb eines Bestandes als auch innerhalb eines Stammes zum Teil beträchtliche Schwankungen der Materialeigenschaften aufweisen kann. Um eine nachhaltige, wertschöpfende Verwendung dieses Rohstoffes auch zukünftig gewährleisten zu können, muss den Anforderungen des Marktes hinsichtlich der Materialeigenschaften nach homogenen Holzprodukten entsprochen werden. Hierfür müssen Systeme in den Beginn der Bereitstellungskette (vergleiche Teilprojekte 1 und 2) beziehungsweise die erste Bearbeitungsstufe im Sägewerk implementiert werden, die eine Erkennung der äußeren und inneren Eigenschaften und somit eine Zuordnung des Rundholzes in moderne, marktfähige Produkte ermöglichen.

In modernen Sägewerken ist eine automatisierte Konturmessung bereits wichtiger Bestandteil zur Bestimmung eines Maßes für die Abrechnung mit den Waldbesitzern. Zur

Sortierung in der Rundholzlinie werden vor allem diese bis auf zehntel Millimeter exakten Daten der äußeren Form des Rundholzes verwendet. Innere Holzmerkmale können bei dieser Sortierung nur in Form einer äußeren Ansprache berücksichtigt werden beruhend auf den Erfahrungen des Bedienpersonals. Eine automatisierte Erkennung von inneren Holzeigenschaften ist bisher nicht integriert. Anforderungen an industrielle Anlagen zur Ermittlung solcher Eigenschaften sollen im Rahmen dieses Projektes am Beispiel der Jahrringbreite erarbeitet, die Schwächen der Auswertungsroutinen ermittelt und diese verbessert werden. Die Jahrringbreite wurde als beispielhaftes Holzmerkmal gewählt, da sie durch direkte Beziehung zur Holzdicke ein wichtiger Parameter zur Bestimmung von Tragfähigkeit und Formstabilität von Schnittholz ist.

## **1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde**

Seit dem Jahr 1999 wird das Themenfeld „Erkennung äußerer und innerer Rundholzmerkmale“ in verschiedenen Projekten in der Abteilung Waldnutzung an der FVA bearbeitet. Neben der Erstellung einer umfänglichen Literaturdatenbank über den Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren wie Ultraschall-, Röntgen-, Tomographie- und Magnetresonanzverfahren im Bereich der Forst-, Holz- und Sägeindustrie (HAUFFE 2001; KAISER 2004) wurden bereits 2001 erste Versuche zur Bestimmung der durchschnittlichen Jahrringbreite an Fichtenrundhölzern mit Hilfe der Ultraschall- und Röntgentechnologie durchgeführt. Für beide Technologien standen zu Projektbeginn nur Prototypen zur Verfügung, die im industriellen Einsatz noch nicht eingesetzt wurden (HAUFFE 2001 & 2004; HAUFFE et al. 2000; HAUFFE und MAHLER 2000; WURSTER 2001a und b).

Mit diesen Versuchen wurde überprüft, ob sich die Jahrringbreite mit Hilfe dieser Techniken grundsätzlich ermitteln lässt und ob eine Rundholzvorsortierung in zumindest zwei Kollektive (bessere, schlechtere Güte) auf Grundlage der Messergebnisse möglich ist. Mit der Vorsortierung wird eine höhere Wertschöpfung ermöglicht, da einerseits ein geringerer Verschnitt und andererseits gleichzeitig je Kollektiv eine optimierte Ausbeute erzielt werden kann. Ein erster Röntgenmessversuch wurde in einem schwedischen Sägewerk durchgeführt. Die maschinellen Messdaten konnten erst nachträglich durch händische Auswertungen gewonnen werden, da eine Onlineauswertung nicht möglich war (HAUFFE 2001 & 2004). Die ermittelten Sortierergebnisse waren sehr zufrieden stellend. Ein Einsatz des getesteten Röntgenmessrahmens unter Produktionsbedingungen war jedoch nicht möglich.

Nach Installation des ersten Röntgenmessrahmens in Deutschland (2003) wurden weitere Versuche zur Bestimmung der Jahrringbreite bei Rundholz durchgeführt. Die Ermittlung der Messergebnisse wurde erstmals im Onlineverfahren vorgenommen, d.h. eine sofortige

Messwertgewinnung und -ausgabe während des Messvorganges war möglich (BURIAN 2003). Die gewonnenen Jahrringbreitenmesswerte dienten in Simulationen wiederum zu einer Vorsortierung der Rundholzabschnitte in zwei Kollektive. Insgesamt konnten größtenteils zufrieden stellende Ergebnisse ermittelt werden, die einen Einsatz unter Produktionsbedingungen in weiteren, umfangreicheren Versuchen sinnvoll erschienen ließen (BURIAN 2003).

Neben der Erkennung innerer Rundholzmerkmale wurden Untersuchungen zur Dimensionsvermessung von Rundhölzern in Rinde, d.h. die Messung des reinen Holzkörpers ohne Berücksichtigung der Rinde durchgeführt. Mit ersten Versuchen konnte gezeigt werden, dass eine Messung grundsätzlich möglich, ihre Messgenauigkeit bisher aber noch nicht praxisreif ist (HAUFFE 2001, LEENEN 2003, WILWERDING et al. 2001).

### **1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens**

Der Schwerpunkt in Teilprojekt 3 wurde auf die Erkennung der Jahrringbreite gelegt, die durch direkte Beziehung zur Dichte ein wichtiger Parameter zur Bestimmung von Tragfähigkeit und Formstabilität von Konstruktionsholz ist. In zwei Praxisversuchen in einem Sägewerk wurden dabei bestehende Algorithmen zur Verarbeitung von Daten eines industriellen Zwei-Ebenen-Röntgenscanners validiert und weiterentwickelt. Neben diesen zwei Praxisversuchen umfasste das Forschungsvorhaben auch Vergleichsmessungen an einem Laborscanner zur Kontrolle der Praxisversuche.

Wegen der Neuheit der Messtechnologie war die Zahl potenzieller Praxispartner begrenzt, so dass für diese Versuche nur ausländische Partner gefunden werden konnten (das Sägewerk Hasslacher Drauland, Sachsenburg, Österreich; und der Anlagenhersteller Microtec, Brixen, Italien). Die Laborversuche wurden an einem neu entwickelten Computertomographen durchgeführt, der während der Projektlaufzeit an der FVA installiert und in Betrieb genommen wurde.

Für die Praxisversuche wurde der Zweiebenen-Röntgenscanner Tomolog<sup>®</sup> der Firma Microtec verwendet (Abbildung 1). Bei diesem Gerät handelt es sich um einen diskreten Scanner mit zwei fest stehenden Röntgenquellen und jeweils gegenüberliegenden Detektorleisten. Es werden damit Röntgenbilder von Stämmen angefertigt, die auf einem Längsförderer durch den Scanner transportiert werden. Ein Ausschnitt eines solchen Bildes von einer der beiden Quellen ist in Abbildung 2 zu sehen. Der Scanner besitzt eine Auflösung von circa 0,8 mm im Querschnitt und bei den verwendeten Einstellungen und einer Vorschubgeschwindigkeit von 110 m/min eine Auflösung von circa 4 mm in Längsrichtung. Ein solcher Scanner ist für die rauen Bedingungen eines Sägewerks

konzipiert und lässt sich mit der dort in der Rundholzlinie üblichen Geschwindigkeit betreiben.

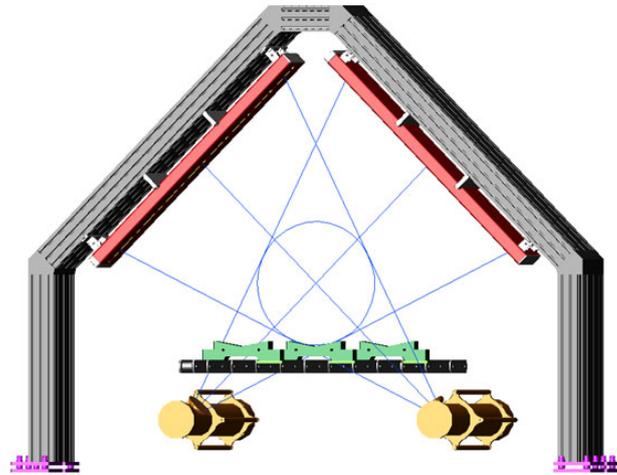


Abbildung 1: Skizze des Zweiebenen-Röntgenscanners Tomolog®

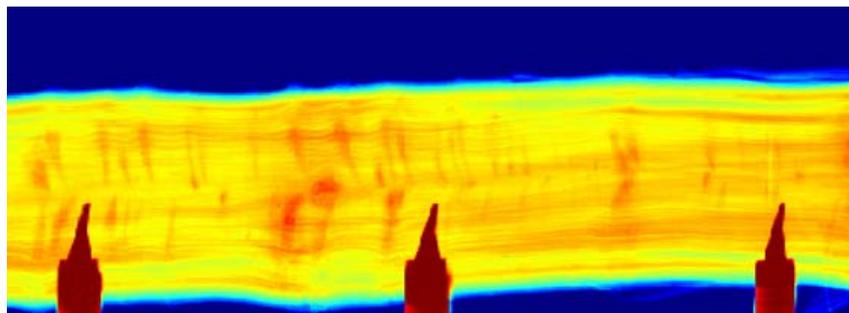


Abbildung 2: Daten des industriellen Scanners: Längsschnitt eines Stammes von einer der beiden Röntgenquellen

Im Gegensatz zu einem diskreten Scanner, bei dem die Röntgenquellen fest installiert sind, dreht sich bei einem Computertomographen (CT), wie der an der FVA Baden-Württemberg installierten Anlage, die Röntgenquelle um das zu betrachtende Objekt. Bei der Rotation um eine festgelegte Position werden dabei Röntgenbilder aus bis zu 2000 unterschiedlichen Richtungen aufgenommen, aus denen dann ein Stammquerschnittsbild (Abbildung 4a) berechnet wird. Der an der FVA Baden-Württemberg installierte Computertomograph CT.LOG® von Microtec (Abbildung 3) verwendet die „spiral-CT-Technologie“, d.h. während der Rotation bewegt sich der Scanner in Längsrichtung gleichförmig entlang des statisch an beiden Enden aufliegenden Versuchsstammes. Mit einer Vorschubgeschwindigkeit von circa 0,3 m/min ist diese Technik zwar deutlich zu langsam für ein Sägewerk, sie liefert aber Bilder von allen Querschnitten (Abbildung 4a) im Abstand von circa 5 mm, an Hand derer zerstörungsfrei Jahrringbreiten für diese Querschnitte bestimmt werden können. Des Weiteren lassen sich aus dem CT-Datensatz auch Daten eines diskreten Tomographen extrahieren und somit ein industrieller Scanner simulieren (Abbildung 4c).

Für das Projekt wurden beide Techniken verwendet, da auf Grund der Geschwindigkeit für die industrielle Anwendung nur ein diskreter Scanner in Frage kommt und die dafür verwendeten Algorithmen am Besten mit Hilfe eines CT verbessert werden können.



Abbildung 3: Computertomograph CT.LOG® an der FVA Baden-Württemberg

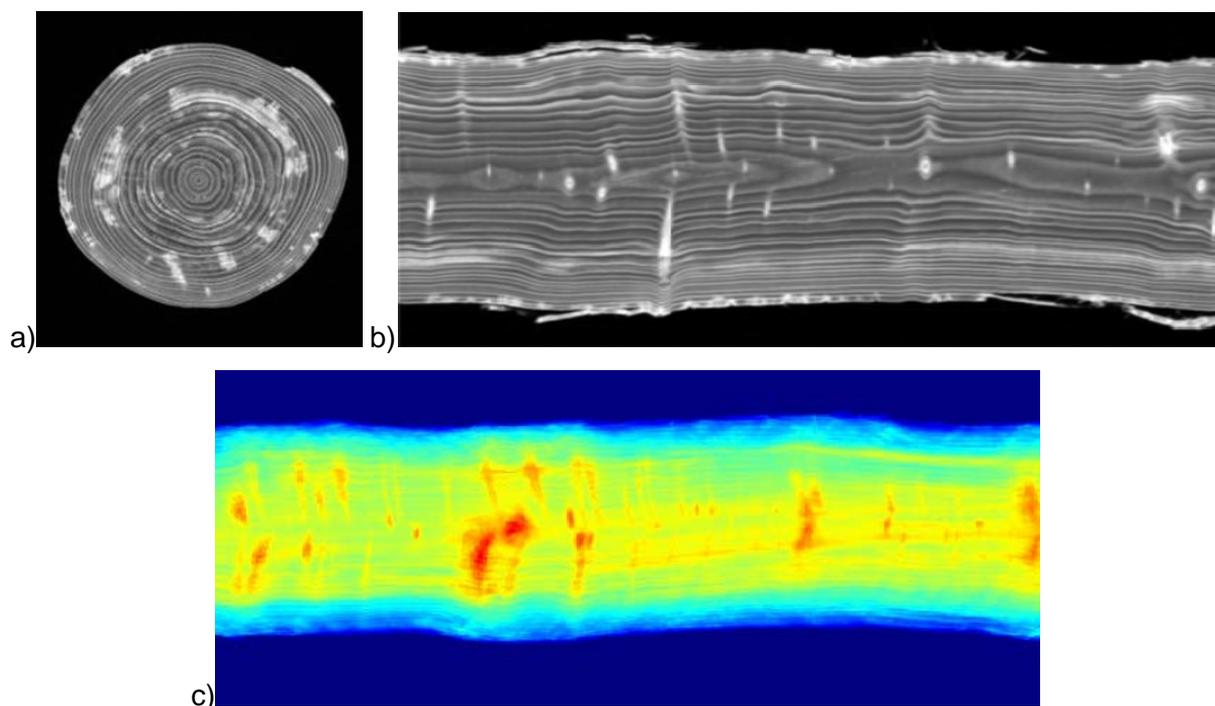


Abbildung 4: CT-Daten: a) Stammquerschnitt; b) Längsschnitt nahe der Markröhre;  
c) Simulation einer feststehenden Röntgenquelle, wie bei einem diskreten Scanner

Es wurden drei Versuche durchgeführt: ein reiner Praxisversuch im Juli 2006 („Versuch 2006“), ein reiner Laborversuch ab Ende 2007 („Versuch 2007“) und ein kombinierter Praxis- und Laborversuch ab April 2008 („Versuch 2008“).

Die Materialauswahl für die Versuche berücksichtigte Ergebnisse aus vorangegangenen Unternehmungen und bezog Material ein, das messtechnisch in Vorversuchen Probleme in der Jahrringbreitenbestimmung erkennen ließ. Die mittleren Durchmesser und mittleren Jahrringbreiten der Einzelkollektive, sowie die Anzahl der Versuchsstämme in den Kollektiven sind in Tabelle 1, Tabelle 2 beziehungsweise Tabelle 3 aufgeführt.

Im ersten Praxisversuch (2006) wurde ein Rundholzkollektiv verwendet, das über Stämme mit sehr großer (> 5 mm) und Stämme mit kleiner, aber mit der vorhandenen Auflösung noch messbarer (2 - 3 mm) Jahrringbreite verfügt, wobei die Dimensionen über den mittleren Stärkebereich (20 – 40 cm Mittendurchmesser) verteilt waren. Die breiten Jahrringe wurden dabei gewählt, da diese bei früheren Tests zu Problemen geführt haben, die schmalere als Referenz.

Tabelle 1: Kennwerte der einzelnen Teilkollektive des Versuchsholzes vom Versuch 2006

Versuch 2006	Anzahl Abschnitte	mittlerer Durchmesser	mittlere Jahrringbreite
Teilkollektiv i	16	32 cm	6,7 mm
Teilkollektiv ii	15	30 cm	3,7 mm

Der Laborversuch 2007 wurde durchgeführt, um eine Jahrringerkennung auf den CT-Bildern zu entwickeln, aber auch um mögliche Probleme in der Aufnahmetechnik und bei unterschiedlichen Holzmerkmalsausprägungen zu untersuchen. Daher wurde ein Rundholzkollektiv mit unterschiedlichen Kombinationen von Dimensionen, Jahrringbreiten und anderen Holzmerkmalen gewählt.

Tabelle 2: Kennwerte des Versuchsholzes vom Versuch 2007

Versuch 2007	Anzahl Abschnitte	mittlerer Durchmesser	mittlere Jahrringbreite
Gesamtkollektiv	96	35 cm	3 mm

Für den kombinierten Praxis- und Laborversuch 2008 wurden erneut Abschnitte ausgewählt, die in Vorversuchen, aber auch bei den Versuchen 2006 und 2007 Probleme bereiteten. Im Einzelnen waren das Abschnitte mit besonders engen und welche mit besonders weiten Jahrringen - unabhängig von der Dimension. Daher wurden Stammabschnitte mit mittleren Dimensionen (Mittendurchmesser zwischen 20 und 35 cm) ausgewählt, wobei das eine Teilkollektiv (Teilkollektiv I) über enge Jahrringe verfügte und das andere (Teilkollektiv II) über breite Jahrringe (beide zusammen in Abbildung 5a). Ein drittes Teilkollektiv

(Teilkollektiv III) wurde gewählt, das Stämme mit großer Dimension und unterschiedlich breiten Jahrringen enthielt (Abbildung 5b). Da diese großen Durchmesser, unabhängig von der Jahrringbreite, zu Problemen geführt haben.

Tabelle 3: Kennwerte der einzelnen Teilkollektive des Versuchsholzes vom Versuch 2008

Versuch 2008	Anzahl Abschnitte	mittlerer Durchmesser	mittlere Jahrringbreite
Teilkollektiv I	36	26 cm	1,2 mm
Teilkollektiv II	25	28 cm	6,6 mm
Teilkollektiv III	20	47 cm	3,9 mm



Abbildung 5: Versuchsholz Versuch 2008

Für die maschinelle Auswertung der Daten des diskreten Scanners stellte die Firma Microtec ihre Messroutine zur Bestimmung der Jahrringbreite zur Verfügung. In dieser Messroutine werden für jeden Stammquerschnitt Jahrringbreitenmesswerte in 16 unterschiedlichen Sektoren ermittelt. Nach einer Plausibilitätsprüfung werden diese jeweils längs des Stammes zu Sektorenergebnissen für den gesamten Stamm zusammengefasst. Das Jahrringbreitenergebnis für den Gesamtstamm (aggregierte Jahrringbreite) ergibt sich jeweils aus dem arithmetischen Mittel dieser Sektorenergebnisse. Für den Versuch 2008 wurden zusätzlich digitale Filter eingebaut, um Störungen bei der Datenaufnahme wie „after glow“

der Detektoren zu kompensieren. Aus diesem Grund mussten auch einige Parameter für diesen Versuch verändert werden.

Um den Einfluss der Durchstrahlungsebene auf das Messergebnis abzubilden, wurden alle Stämme für die weitere Untersuchung mit eindeutigen Markierungen versehen (Abbildung 6).



Abbildung 6: Markierung der Messebenen mit Sprühfarbe beim Durchlauf

Zusätzlich wurden beim Versuch 2008 zwei Schrauben an der Stockseite in die Querschnittsfläche der Stämme gedreht (Abbildung 7). Da Metall eine deutlich höhere Dichte als Holz oder Wasser hat und damit Röntgenstrahlen stärker absorbiert, sind die Metallschrauben in den Röntgenbildern von diskretem Scanner und CT deutlich zu erkennen. So lassen sich die Bilder von industriellem Scanner und CT für die weiteren Untersuchungen direkt in die gleiche Orientierung bringen.



Abbildung 7: Markierung durch eine Schraube

Die Erhebung der Jahrringanzahl und die Durchmesserbestimmung für die manuelle Referenzmessung erfolgte im Versuch 2006 im Anhalt an die Methodik, die auch bei Vorversuchen Anwendung fand, so dass ein Vergleich der Ergebnisse möglich war. Es wurde jedoch zum Zweck der besseren Analyse eine neue Methode zur

Jahrringbreitenausählung entwickelt und bei den Versuchen 2006 und 2008 verwendet, die stark an der maschinellen Auswertung orientiert ist. Im Gegensatz zur ursprünglichen Ausählungsart wurde dabei berücksichtigt, dass der Stammquerschnitt, wie in Abbildung 8 gezeigt, fächerförmig durchstrahlt wird.

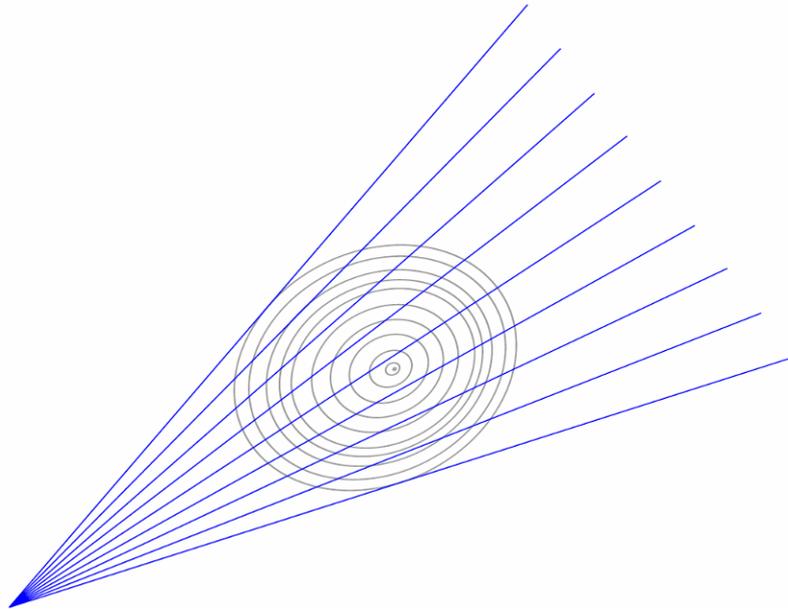


Abbildung 8: Schematische Darstellung des Strahlungsverlaufs von einer Röntgenquelle durch einen Stammquerschnitt

Die Aufteilung in Sektoren fand daher diesem Fächer entsprechend statt und wurde auf die den Versuchsstämmen an Stock und Zopf entnommen Stammscheiben übertragen (Abbildung 9). Wie bei der maschinellen Auswertung wurde in diesen Sektoren einzeln die Jahrringbreite bestimmt. Sektorenweise wurde der Mittelwert zwischen Stock- und Zopfscheibe bestimmt und als Referenz für die maschinellen Sektorenergebnisse verwendet. Der maschinellen Auswertung entsprechend wurde auch eine aggregierte Jahrringbreite aus den manuellen Sektorenergebnissen bestimmt.

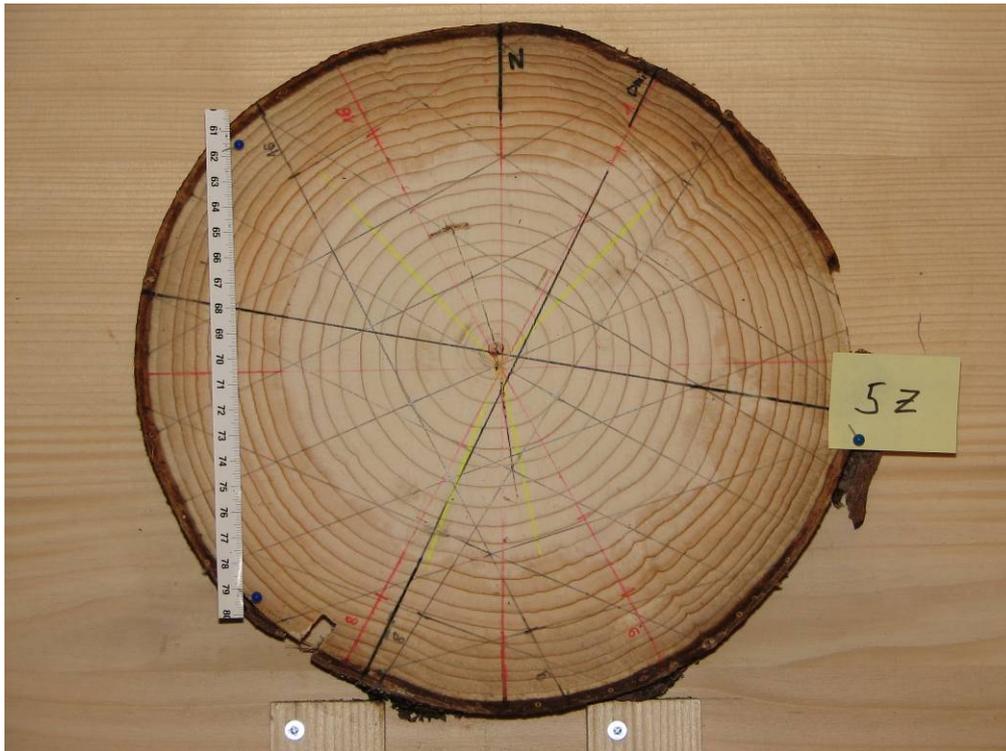


Abbildung 9: Stammscheibe mit den markierten Messebenen für die manuelle Auszählung

Als weiteres Vergleichsmaß wurde für den Versuch 2008 ein zopfnaher Querschnitt in den CT-Daten gewählt, in dem manuell eine weitere mittlere Jahrringbreite bestimmt wurde (im Folgenden als „Jahrringbreite aus CT-Bildern“ bezeichnet). Dabei ist zu beachten, dass beim Computertomographen wie auch beim diskreten Scanner auf Grund der Auflösung eine untere Grenze für die zu erkennende Jahrringbreite besteht. Diese liegt bei 2 mm. Falls ein Stammquerschnitt Jahrringe mit einer Jahrringbreite unterhalb dieser 2-mm-Grenze enthielt, wurde eine Jahrringbreite von „0“ für die Grafiken verwendet.

#### 1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfung

Seit Ende der 80er Jahre wird die Röntgentechnologie im Bereich der Holz- und Sägeindustrie eingesetzt. Zu Projektbeginn spielte sie in der Praxis im Qualitätscontrolling produzierter Span- oder MDF-Platten, im Schnittholzbereich und als Splittersuchgerät in der Papierindustrie eine Rolle (INVISION 2004, MEDVED et al. 1998, MICROTEC 2004, PETERS 1989, WIMMER et al. 2003).

In der Sägeindustrie hingegen sind erst in den Jahren kurz vor Projektbeginn Röntgengeräte erprobt und versuchsweise implementiert worden, die alle jedoch noch Prototypen darstellten. Es bieten sich für einen Einsatz im Sägewerk zwei verschiedene Röntgensysteme an. Einerseits können Computertomographen (CT) eingesetzt werden, wie sie beispielsweise in der Metallindustrie zur Qualitätsüberprüfung von Schweißnähten zur

Anwendung kommen. Andererseits steht die diskrete Tomographie zur Verfügung, bei der die Stämme mit fest installierten Röntgenquellen und -detektoren durchleuchtet werden. Diese Systeme besitzen gegenüber einem CT die Vorteile, dass sie unempfindlicher gegenüber Umwelteinwirkungen (z.B. Temperatur, Staub etc.) sind, ohne größere Probleme in den Produktionsablauf integriert werden, sowie eine Erkennung und Auswertung innerer Rundholzmerkmale unter Produktionsbedingungen durchführen können (ANDREU und RINNHOFFER 2003, HAUFFE 2002, RINNHOFFER et al. 2000, SCHMOLDT et al. 1999a und 1999b).

Beide Systeme sind zu Praxistests in deutschen beziehungsweise europäischen Sägewerken installiert. Sie besitzen jeweils unterschiedliche Vorteile, die sich für bestimmte Sägewerkstypen beziehungsweise Einsatzgebiete anbieten. In Sägewerken mit großem Jahreseinschnittsvolumen (= Einschnitt > 200.000 Fm) ist die diskrete Tomographie geeigneter, die eine Rundholzvorsortierung zu homogeneren Teilkollektiven möglich ist. Aufgrund des hohen Durchsatzes bzw. Einschnittes pro Schicht, kann auf eine differenzierte Betrachtung der inneren Heterogenität im Stamm keine Rücksicht genommen werden. Hingegen ist dies beim Einschnitt von starkem Wertholz nicht der Fall. Hier wird bei jeder Einschnittswahl bzw. Entscheidung die Information über die Art und Verteilung der inneren Rundholzmerkmale genutzt, um eine höhere Ausbeute bzw. Wertschöpfung zu erreichen. Hier bietet sich daher die CT-Technologie an.

Im Bereich der Forschung sind in den Jahren vor Projektbeginn verschiedene Arbeiten in folgenden Bereichen durchgeführt worden: „Hardwareentwicklung“ (ANDREU und RINNHOFFER 2001, SCHMOLDT und ARAMANN 1996 und SCHMOLDT et al. 1996); „Softwareentwicklung“ (BENSON-COOPER et al. 1982, BIRKELAND AND HOLOYEN 1987 und GUPTA et al. 1998a und b); „Ausbeuteberechnungen“ (SCHMOLDT und ARAMANN 1996 und SCHMOLDT et al. 1996); „Versuchsreihen zur Überprüfung der Erkennung innerer Rundholzmerkmale“ (BURIAN 2003, HAUFFE et al. 2000, HAUFFE 2001 & 2004, HAUFFE und MAHLER 2000, LEENEN 2003 und OJA et al. 2003). Die vorliegenden Untersuchungen schließen sich an diese Arbeiten direkt an.

## **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Neben den Wissenschaftspartnern an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg und der Abteilung „Biometrie und Informatik“ der FVA Baden-Württemberg, die in anderen Teilprojekten am Verbundprojekt „Matchwood“ teilnahmen, waren in Teilprojekt 3 Industrie-Beteiligungen notwendig und vorgesehen. Entsprechend der Zielrichtung des Vorhabens wurden dabei Betriebe der Sägeindustrie und Herstellerfirmen für Sägewerkstechnik

beteiligt, um die industrielle Relevanz der Fragestellung sicher zu stellen und eine Implementierung der Ergebnisse in die Praxis zu ermöglichen.

Es wurde mit zwei industriellen Partnern eine Kooperation in dem Projekt vereinbart (Firma Hasslacher Drauland Holzindustrie GmbH, Sachsenburg, Österreich; Firma Microtec GmbH, Brixen, Italien). Bei den Betrieben handelt es sich um international führende Vertreter, die schon zu Projektbeginn über Erfahrungen bzw. technisches Know-how der Erkennung innerer Holzeigenschaften verfügt haben.

Microtec wurde als Partner gewählt, weil es die zu Projektbeginn einzige Firma weltweit war, die bereits einen Messrahmen herstellte, der im Online-Einsatz eine durchschnittliche Jahrringbreite messen und nach ihr eine Rundholzvorsortierung mit zufrieden stellenden Ergebnissen durchführen konnte (BURIAN 2003, HAUFFE 2004).

In Zentraleuropa gibt es nach wie vor nur vereinzelte Sägewerksbetriebe, die über einen diskreten Röntgenscanner zur Erkennung innerer Holzeigenschaften verfügten. Auf einem solchen Scanner sollten Praxiserprobungen in Zusammenarbeit mit den Industriepartnern durchgeführt werden. Die Firma Hasslacher Drauland verfügt über eine entsprechende Anlage und konnte für diese Kooperation gewonnen werden.

## **2 Eingehende Darstellung**

### **2.1 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans**

Durch die prozessorientierte Gestaltung des Material- und Informationsflusses zwischen Baum und Produkt werden kostenintensive Schnittstellen der Holzbereitstellungskette eliminiert bzw. effizienter gestaltet. Bei der Erzeugung von Schnittholz entfallen 50 Prozent der Kosten auf das Rohholz. Durch die verbesserte Vorsortierung von Rundholz beziehungsweise genauere Kenntnis des Einzelstamms lässt sich der Materialeinsatz verringern beziehungsweise aus der gleichen Menge an Rohmaterial eine höhere Ausbeute generieren.

Durch die Einbeziehung von Projektpartnern aus der Praxis bereits während des Projekts wurde sichergestellt, dass diese Vorteile unmittelbar erkannt und bereits während der Projektlaufzeit parallel umgesetzt werden konnten.

Für die industrielle Anwendung einer Merkmalsdetektion wie zum Beispiel der Bestimmung der Jahrringbreite müssen die Anforderungen in einem Pflichtenheft je Werk präzisiert werden. Anforderungen, die in einem solchen Pflichtenheft spezifiziert werden sollten,

wurden im Rahmen des Projektes mit den Partnern ermittelt und für die betrachteten Röntgenscanner überprüft.

## **2.2 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen**

Während der Durchführung des Projektes entwickelte die Firma Microtec einen Computertomographen (CT) speziell für Rundholz. Die Entwicklung dieses Rundholz-CTs eröffnete die Möglichkeiten zu weit detaillierterer Erfassung der inneren Holzstruktur als ursprünglich bei Projektbeantragung erkennbar war, weshalb die ursprüngliche Planung des Forschungsvorhabens in Einverständnis mit dem Projektträger abgeändert und diese Technologie für die Untersuchungen in der zweiten Hälfte der Projektlaufzeit angewandt wurde.

## **2.3 Erfolgte Veröffentlichungen**

BAUMGARTNER, R.; BRÜCHERT, F.; SAUTER, U.H. (2008) *Automatisierte Jahrringbreitenerkennung mit industriellen Röntgenscanner und Computertomographen*. Tagungsbeitrag der Forstwissenschaftlichen Tagung, 24.-27. September 2008, Freiburg, in: Freiburger Forstliche Forschung Berichte, Heft 76, S.21

BRÜCHERT, F.; BAUMGARTNER, R.; SAUTER, U. H. (2008): *Ring width detection for industrial purposes – use of CT and discrete scanning technology on fresh roundwood*. In: Gard (ed.): End user's needs for wood material and products. Proceedings, Cost Action E53 Conference 29.-30.10.2008, Delft, The Netherlands, 157-164

### 3 Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht

#### 3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Das Projekt trägt dazu bei, das ökologisch und gesellschaftlich anerkannte Konzept der naturnahen Waldwirtschaft mit den Anforderungen einer im globalen Wettbewerb stehenden Holzindustrie zu verknüpfen und damit den Wirtschaftssektor Forst-Holz in Deutschland insgesamt zu fördern und international wettbewerbsfähig zu machen. Der Forschungsansatz ist industrie- und nachfrageorientiert, indem die Möglichkeiten einer optimalen Zuordnung vom Rohstoff und Produktionsverfahren/Produkt ausgelotet und in ihrem Effekt bewertet werden. Die optimale Abstimmung von Rohstoff und Produkt sichert eine ressourceneffiziente Verwendung des nachwachsenden Rohstoffes Holz.

#### 3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen

Für den Versuch 2006 wurde eine einmalige maschinelle Vermessung aller Abschnitte mit dem Zweiebenen-Röntgenscanner Tomolog<sup>®</sup> von der Firma Microtec durchgeführt und wie in Absatz 1.3 beschrieben für das Versuchskollektiv die maschinelle und manuelle Jahrringbreite nach den beschriebenen Verfahren ermittelt. In der maschinellen Auswertungsroutine gibt es zahlreiche Parameter, die variabel gewählt werden können. Beispielhaft sind in Abbildung 10 die Ergebnisse für drei verschiedene Parametersätze im Vergleich zur manuellen Referenzmessung an Stock- und Zopfscheibe dargestellt. Während die oberen beiden Parameterkombinationen  $P_1$  (Abbildung 10a) und  $P_2$  (Abbildung 10b) zu allgemein großer Streuung führen, ist bei Parameterkombination  $P_3$  (Abbildung 10c) die Streuung für die meisten Werte relativ gering. Allerdings gibt es dafür zwei Gruppen von sechs beziehungsweise zwei Stämmen, die nur etwa halb so große beziehungsweise gar keine Ergebnisse liefern. Zum Teil ist das auf das Phänomen des „after glow“ der Detektoren zurückzuführen, aber dies ist keine vollständige Erklärung für alle Fehlmessungen. Eine detailliertere Untersuchung wurde daher angeschlossen.

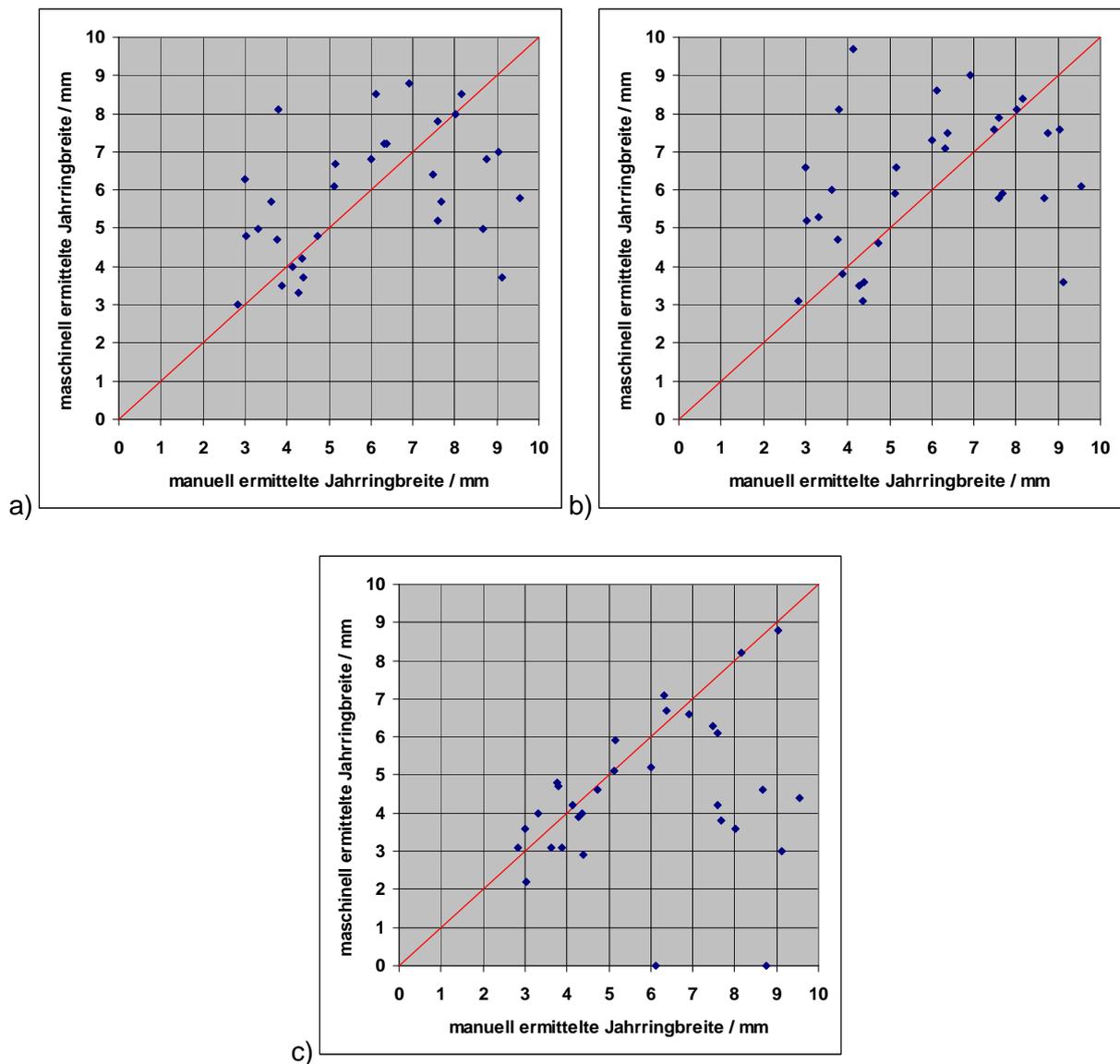


Abbildung 10: Vergleich der maschinell und manuell ermittelten Ergebnisse für die Jahrringbreite mit unterschiedlichen Parameterkombinationen bei der maschinellen Auswertung (Referenz Mittelwert von Stock- und Zopfscheibe), Versuch 2006

Vergleicht man bei gleichem Parametersatz die maschinelle Messroutine in höherer räumlicher Auflösung (sektorenweise wie in 1.3 beschrieben) mit der Referenzmessung (ebenfalls sektorenweise), ergibt sich eine größere Streuung (siehe Abbildung 11). Es sind nur Sektoren dargestellt, in denen maschinell die Jahrringbreite ermittelt werden konnte. Eine Ursache für die breite Streuung ist, dass bei der maschinellen Ermittlung viele Querschnitte entlang des kompletten Abschnitts betrachtet werden, bei der manuellen Auswertung jedoch nur je ein Querschnitt an Zopf und Stock betrachtet wird.

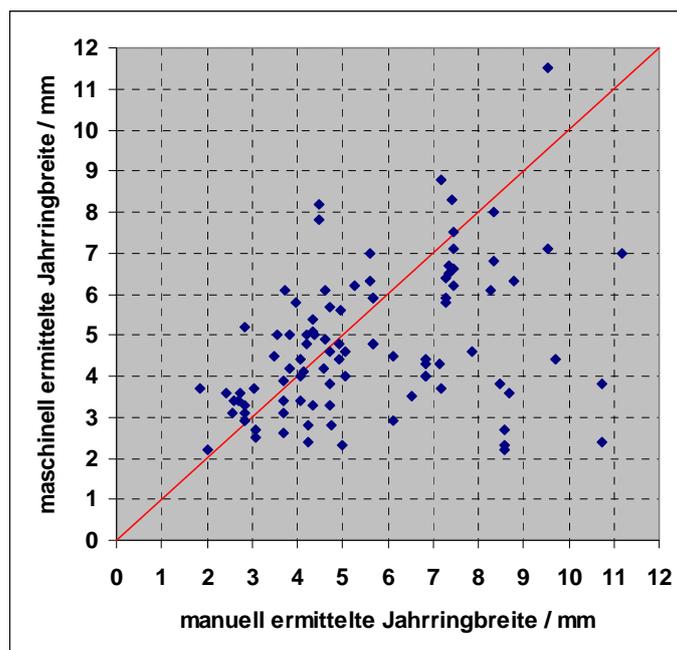


Abbildung 11: Vergleich der maschinell und manuell ermittelten Sektorenergebnisse für die Jahrringbreite, Versuch 2006; Parameter wie in Abbildung 10c

Entlang der Stammachse kann sich die Jahrringbreite innerhalb eines Sektors stark verändern, wie bereits beim Vergleich der manuellen Messung zwischen Stock und Zopf zu erkennen ist (Abbildung 12). Die größten Unterschiede treten dabei bei Erdstammstücken auf, bei denen grundsätzlich der Wurzelanlauf mit berücksichtigt wurde. Dies wurde bewusst so gewählt, da auch bei der maschinellen Jahrringbreitenbestimmung in dem Bereich des Wurzelanlaufs Werte ermittelt werden. Jedoch auch alle anderen Abschnitte wiesen Unterschiede zwischen Stock und Zopf auf. Diese zum Teil sehr großen Schwankungen in den manuellen Referenzmessungen führen zu Problemen bei der Identifikation von fehlerhaften Sektorenergebnissen und den zugrunde liegenden Ursachen. Daher wurde im Versuch 2008 zusätzlich eine Referenzmessung mit einem Computertomographen durchgeführt, um so eine Referenz für jeden Stammquerschnitt zu erhalten.

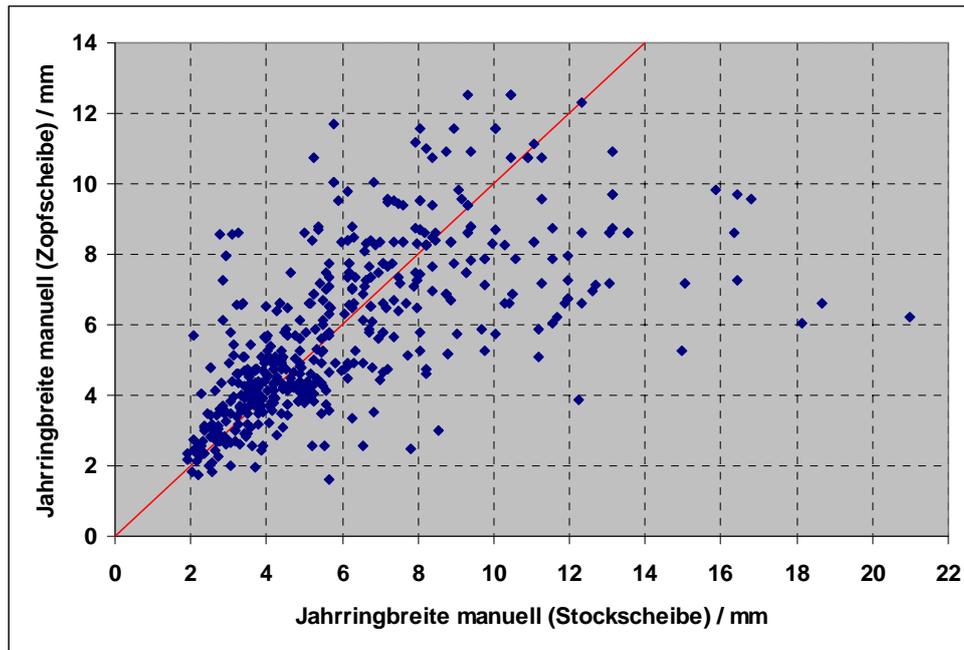


Abbildung 12: Vergleich von manuell ermittelten Jahrringbreiten in Einzelsektoren auf Stock- und Zopfscheibe, Versuch 2006

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass wie in Vorversuchen die großen Jahrringbreiten teilweise stark unterschätzt wurden. Dies konnte man zum Teil auf das Phänomen „after glow“ der Detektoren zurückführen, zum andern Teil ließ sich allerdings keine Erklärung ermitteln, da in den mittleren Bereichen des Stammes keine Referenzmessung durchgeführt werden konnte.

Im Laborversuch (2007) wurde zunächst ein repräsentativer Teil des Kollektivs wiederholt mit unterschiedlichen Einstellungen von Spannung und Stromstärke gescannt, um die dabei im Durchschnitt am kontraststärksten Einstellungen zu ermitteln. Mit diesen Einstellungen wurde das gesamte Versuchskollektiv mit dem Computertomographen gescannt. An Hand dieser Daten wurde die Entwicklung von Erkennungsalgorithmen für die Jahrringstruktur in den CT-Bildern fortgeführt, die mit Datenmaterial eines medizinischen Computertomographen, mit dem in Schweden Rundholz für Versuchszwecke gescannt wird, begonnen wurde.

Ein limitierender Faktor bei der Erkennung von Jahrringen ist die geometrische Auflösung des Scanners, die keine Erkennung von Jahrringbreiten unter 2 mm zulässt. Bei großen Dimensionen kam es auch bei großer Spannung an der Röntgenquelle zu einer starken Absorption der Röntgenstrahlen und damit zu einem geringen Signal an den Detektoren. Dies führt zu einem stärkeren Einfluss des konstanten Hintergrundrauschens der Messung. In wie weit dieses Problem auch beim diskreten Scanner zu Messungenauigkeiten führt, konnte in diesem Versuch nicht untersucht werden.

Der zweite Praxisversuch (2008) wurde wie der erste mit dem diskreten Scanner Tomolog<sup>®</sup> auf dem Rundholzplatz der Firma Hasslacher in Sachsenburg (Österreich) durchgeführt. Im Gegensatz zum ersten Versuch wurden die Abschnitte bei diesem Versuch mehrere Male gescannt, da auch die Messkonstanz untersucht wurde. Auf Grund der Erkenntnisse aus dem Versuch 2007 wurden je zwei Durchläufe bei zwei unterschiedliche Einstellungen der Röntgenquelle verwendet (4 Durchläufe insgesamt). Die ersten zwei Durchläufe wurden mit einer Spannung von 120 kV und einer Stromstärke von 9 mA durchgeführt. Bei den Durchläufen drei und vier wurden eine Spannung von 155 kV und eine Stromstärke von 5 mA gewählt.

Die im Sägewerk aufgenommenen Daten wurden wie in 1.3 beschrieben verarbeitet. Die so ermittelten Werte für die Jahrringbreite werden im Folgenden als „maschinelle Jahrringbreite“ oder „Jahrringbreite maschinell“ bezeichnet.

Zur Untersuchung der Messkonstanz wurden die Ergebnisse der maschinellen Auswertung von Durchlauf 1 und Durchlauf 2 verglichen, bei denen nur die Orientierung der Stämme unterschiedlich war, die sonstigen Einstellungen aber die gleichen waren (Abbildung 13).

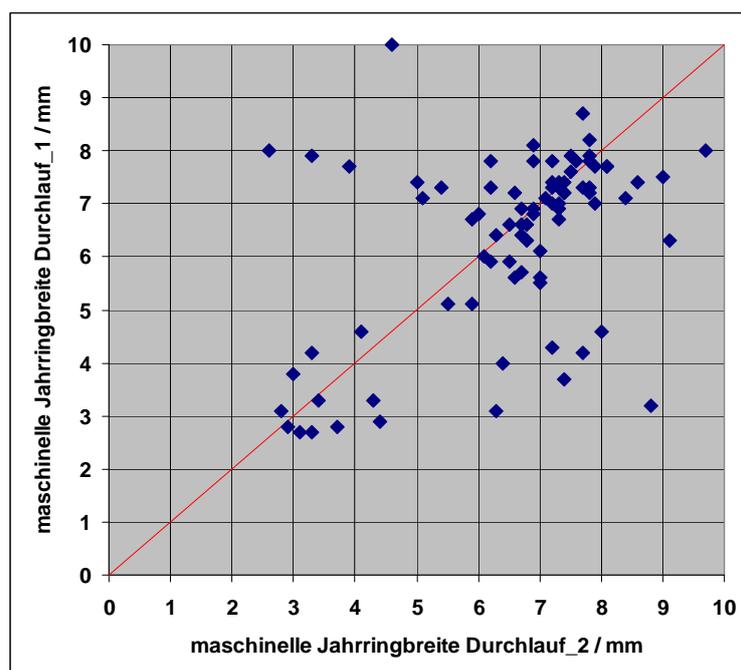


Abbildung 13: Vergleich der maschinellen Ergebnisse bei wiederholtem Durchlauf;  
Untersuchung der Messkonstanz

Das Versuchsholz wurde zusätzlich zur industriellen Vermessung für Vergleichsmessungen an der FVA Baden-Württemberg mit dem dort installierten Computertomographen CT.LOG<sup>®</sup> unter Berücksichtigung der Orientierung ein weiteres Mal gescannt und die Auswertung wie in 1.3 beschrieben durchgeführt.

Die manuelle Jahrringbreitenermittlung (im Folgenden als „manuelle Jahrringbreite“ oder „Jahrringbreite manuell“ bezeichnet) wurde an Stock- und Zopfscheibe von 16 repräsentativen Rundholzabschnitten (vier aus Teilkollektiv I, vier aus Teilkollektiv II und acht aus Teilkollektiv III) durchgeführt. Diese Auswahl wurde getroffen, um einen Vergleich zum Versuch 2006 zu bekommen, die eigentliche Referenzmessung stellt allerdings die CT-Messung dar.

Wie im Versuch 2006 wurden auch im Versuch 2008 die Ergebnisse der manuellen Auswertung an Stock- und Zopfscheibe verglichen (Abbildung 14). Dabei fällt auf, dass wie auch schon im ersten Versuch bei der Auswertung von Einzelsektoren bei größeren Jahrringbreiten eine größere Streuung zwischen den beiden Werten auftritt, bei kleinen Jahrringbreiten dagegen etwa das gleiche Ergebnis ermittelt wird. Für den Vergleich der Sektorenergebnisse bei großen Jahrringbreiten bedeutet dies aber weiterhin, dass die über den kompletten Stamm ermittelten, maschinellen Ergebnisse ähnlichen Schwankungen unterliegen können.

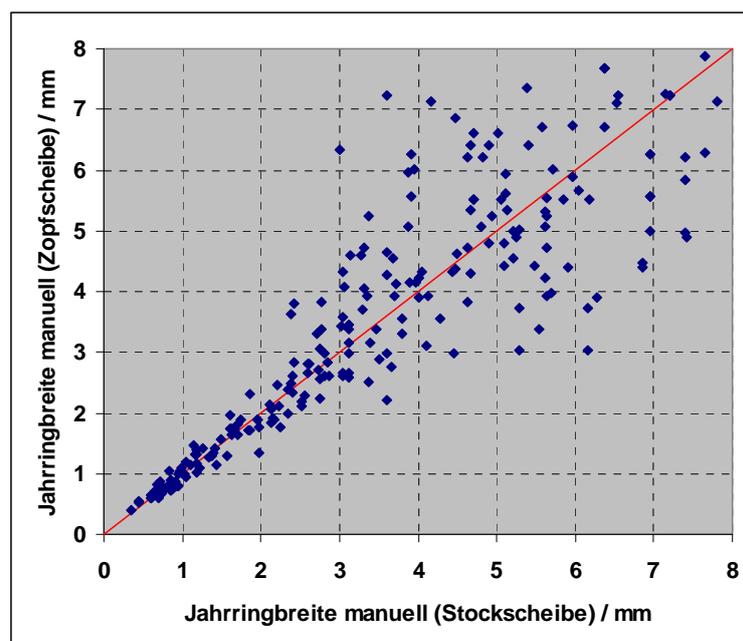


Abbildung 14: Vergleich von manuell ermittelten Jahrringbreiten in Einzelsektoren auf Stock- und Zopfscheibe, Versuch 2008

Dies lässt sich beim Vergleich der Sektorenergebnisse von maschineller und manueller Auswertung beobachten (Abbildung 15). Des Weiteren fällt auf, dass bei geringen Jahrringbreiten (unter 2,5 mm) bei der maschinellen Auswertung zu große Werte ermittelt werden. Die Ursache für diese Fehlmessungen ist die Auflösung des Scanners. Eine Jahrringbreite unter 1,6 mm lässt sich mit dem diskreten Scanner durch Geometrie und Detektorgröße bedingt nicht messen. Auf Grund der rauen Bedingungen in einem Sägewerk

und der damit verbundenen Anfälligkeit für einzelne fehlerhafte Pixel kann davon ausgegangen werden, dass Jahrringbreiten unter 2,4 mm nur unsicher ermittelt werden können.

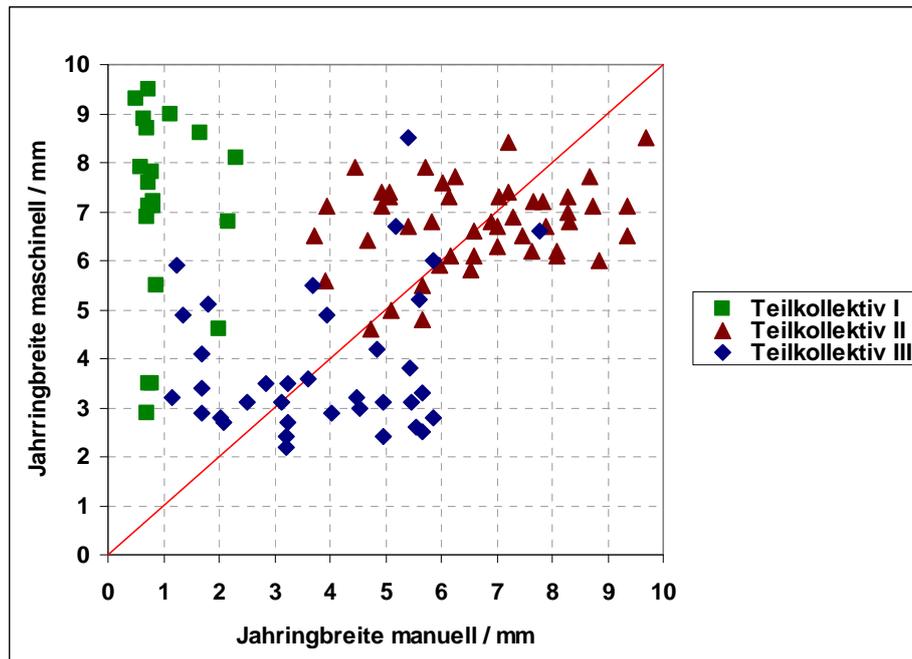


Abbildung 15: Vergleich der maschinell und manuell ermittelten Jahrringbreiten für Einzelsektoren, Versuch 2008

Betrachtet man statt der sektorenweisen die aggregierte Jahrringbreite, gemittelt aus allen Sektoren, und vergleicht die Referenzmessungen auf Stock- und Zopfscheibe so ist die Streuung deutlich geringer (Abbildung 16).

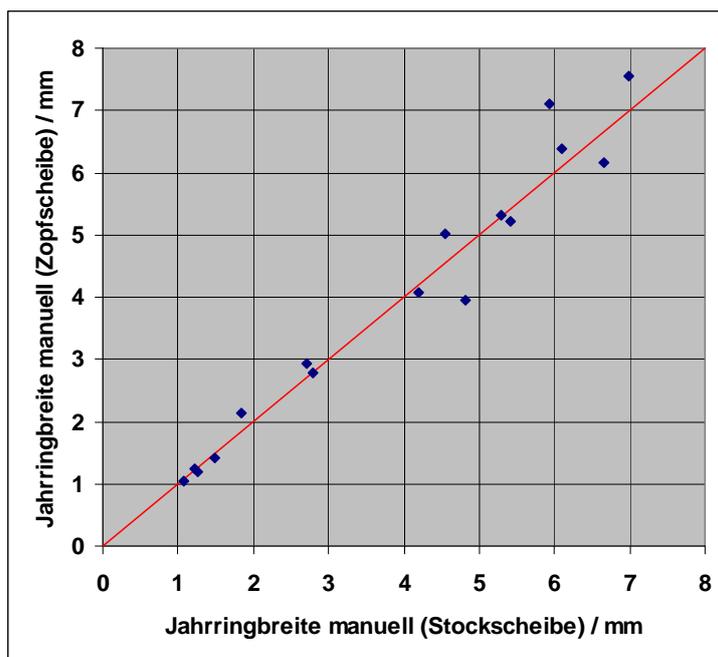


Abbildung 16: Vergleich der manuell ermittelten, aggregierten Jahringbreite auf Stock- und Zopfscheibe, Versuch 2008

In Abbildung 17 ist der Mittelwert aus der Referenzmessung (Stock- und Zopfscheibe) mit den Ergebnissen der maschinellen Auswertung verglichen. Die Abschnitte aus Teilkollektiv I lassen sich mit dem verwendeten Scanner wegen der zu geringen Auflösung nicht vermessen. Durch eine Veränderung verschiedener Parameter konnte aber nicht die gewünschte Zurückweisung als nicht messbar erreicht werden. Für die Zukunft ist ein Vorfilter angedacht, der diese Stämme auf Grund des geringeren Kontrasts entsprechend bewertet. In Teilkollektiv II konnte im Gegensatz zu den weitringigen Abschnitten im Versuch 2006 durch Änderung der Auswertungssoftware eine gute Korrelation erreicht werden. Eine starke Unterschätzung wie in den früheren Versuchen konnte so vermieden werden. In Teilkollektiv III konnten nur zum Teil gute Ergebnisse erreicht werden. Zum Teil liegt die Ursache in der Heterogenität der Jahrringe innerhalb eines jeden Stammquerschnittes. Um weitere Gründe für die Abweichungen / fehlerbehafteten Messungen zu ermitteln, muss die Auswertung der CT-Daten noch fortgeführt werden, was innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr möglich war.

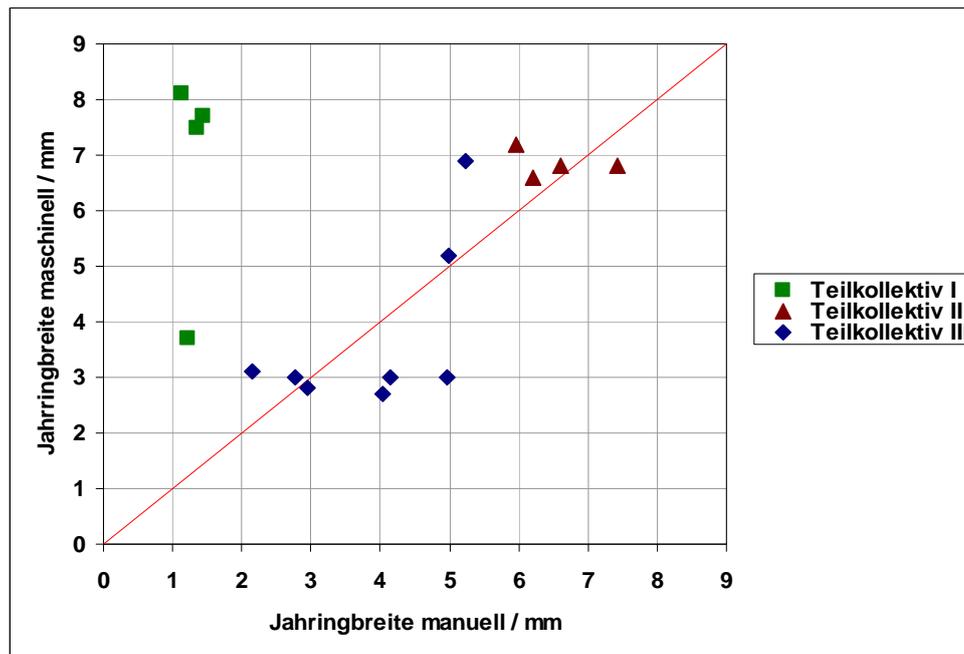


Abbildung 17: Vergleich der maschinell und manuell ermittelten Gesamtergebnisse für die Jahringbreite, Versuch 2008

Abbildung 18 zeigt den Vergleich der manuellen Referenzmessung mit den aus CT-Bildern ermittelten Jahringbreiten. Dabei lassen sich für Teilkollektiv I auf Grund der Auflösung des CT keine Jahringbreiten bestimmen (in der Darstellung Wert „0“). Auch ein Stamm aus Teilkollektiv III beinhaltet einige Jahrringe, die zu eng waren, um sie mit dem CT aufzulösen. Daher ist auch für diesen Stamm der Wert „0“ eingetragen. Für alle anderen Stämme gibt es nur geringere Abweichungen. Die Jahringbreite aus den CT-Bildern lässt sich demnach mit ähnlicher Präzision wie die manuellen Werte als Referenz verwenden.

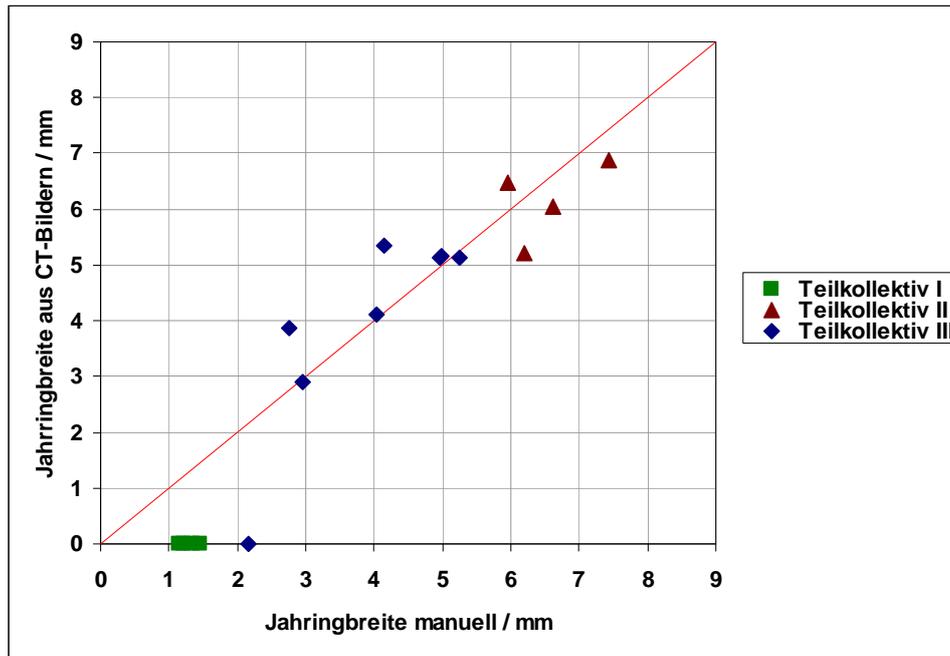


Abbildung 18: Vergleich der manuell und der auf den CT-Bildern manuell ermittelten Gesamtergebnisse für die Jahringbreite, Versuch 2008

In Abbildung 19 sind die aus CT-Bildern ermittelten Jahringbreiten als Referenzwerte gegen die maschinellen Ergebnisse aufgetragen. Die Darstellung lässt sich ähnlich interpretieren wie Abbildung 17. Für Teilkollektiv I wird deutlich, dass die räumliche Auflösung beider Scannertypen für eine Erkennung der Jahrringe nicht ausreicht.

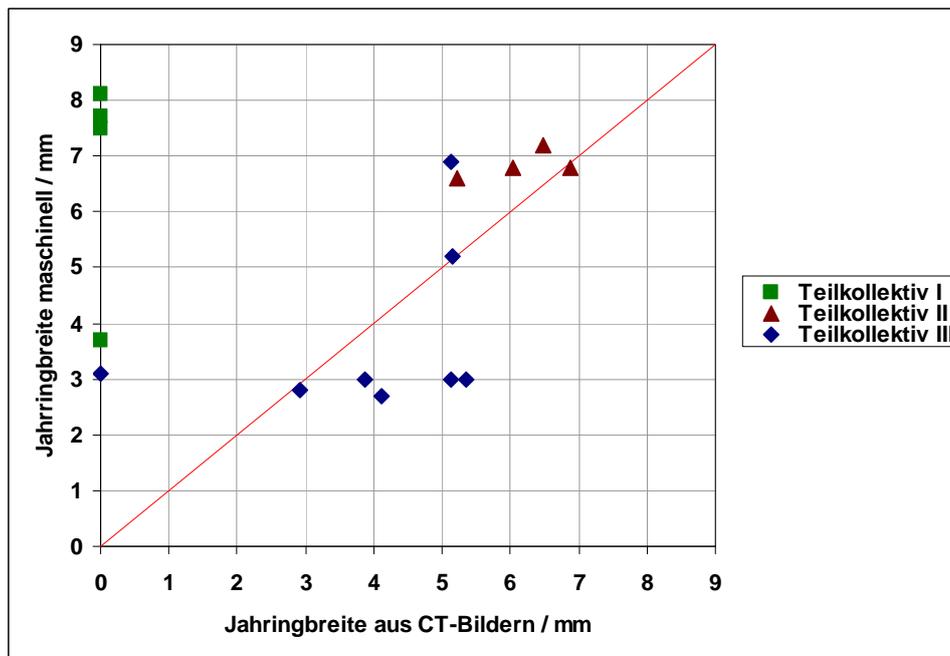


Abbildung 19: Vergleich der maschinell und der auf den CT-Bildern manuell ermittelten Gesamtergebnisse für die Jahringbreite, Versuch 2008

Im Rahmen des Projektes konnte die Möglichkeit der automatisierten Jahrringbreitenvermessung mit Röntgentechnologie für Stämme im mittleren Jahrringbreitenbereich (zwischen 3 und 6 mm) und Dimensionen unter 40 cm bestätigt werden. Bei geringeren Jahrringbreiten reicht die Auflösung des Scanners nicht aus, die Jahrringbreite zu erkennen. Ein Vorfilter, der auf Grund des geringeren Kontrasts in diesen Bildern pauschal „Jahrringbreite unter 3 mm“ ausgibt, wird in die Software integriert werden. Für Jahrringbreiten über 6 mm konnte die Software im Rahmen des Projektes so weit verbessert werden, dass zuverlässige Ergebnisse erreicht werden konnten. Bei stärkeren Dimensionen müssen die begonnen Auswertungen noch über die Projektlaufzeit hinaus fortgeführt werden, da die in den aufgenommen Daten vorhandenen Information in der Kürze der nach dem zweiten Versuch verbliebenen Projektzeit nicht mehr vollständig genutzt werden konnten. Mit der zusätzlichen, zeitnahen Aufnahme von CT-Daten ist jedoch ein wichtiger Schritt getan, die Algorithmen für dieses starke und im Jahrringaufbau ungleichmäßige Stammmaterial zu verbessern.

Für die industrielle Anwendung einer Merkmalsdetektion wie zum Beispiel der Jahrringbreitenbestimmung müssen die Anforderungen in einem Pflichtenheft je Werk präzisiert werden. Eine Rolle spielen dabei Geschwindigkeit, Messgenauigkeit (technische Auflösung), Präzision, Konstanz in der Messwiederholung und Unabhängigkeit von der Umgebung. Die Spezifikationen dieser Parameter können sich von Werk zu Werk je nach Produktspektren unterscheiden. Ein Produzent von Schnittholz für Konstruktionszwecke wird dabei vermutlich besonders Wert auf eine hohe Messgeschwindigkeit legen, während ein Sägewerk, das Wertholz verarbeitet, eher eine hohe Präzision fordert.

Für die beiden betrachteten Technologien lassen sich die Geschwindigkeit und die Messgenauigkeit mit 110 m/min und 0,8 mm für den diskreten Scanner und 0,3 m/min und 1 mm für den CT angeben. Die Präzision (vergleiche Abbildung 17) und die Messkonstanz (Abbildung 13) bei der Bestimmung der Jahrringbreite mit dem diskreten Scanner ist gerade für große Dimensionen noch nicht zufrieden stellend. Für den CT müssen die Auswertungsalgorithmen weiterentwickelt werden, so dass auch mit dieser Technologie Jahrringbreiten beziehungsweise auch die Jahrringstruktur automatisiert erkannt werden kann. Für die manuelle Auswertung der CT-Daten ist die Präzision (Abbildung 18) zufrieden stellend.

### **3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

Für einen Einsatz der Röntgentechnologie in der industriellen Praxis ist neben der Verwendung einer Erkennung innerer Holzmerkmale in der Sägeindustrie auch eine Verwendung in der Papier- und Zellstoffindustrie vorstellbar. So lässt sich dort mit einer

besseren Kenntnis des Rohstoffs die Ausbeute an Zellstoff und dessen Qualität abschätzen, aber auch eine Einsparung von Zusatzstoffen wie zum Beispiel Bleichmitteln zur Erreichung des gewünschten Weißgrades (vgl. TP4) erreichen.

Für die Forschung ergeben sich aus der Röntgentechnologie ebenfalls weitere Anwendungsmöglichkeiten. Ein Vorteil der Datenaufnahme mit dem Computertomographen ist die Möglichkeit zur Simulation eines diskreten Tomographen. So lassen sich aus dem kompletten, mit dem CT aufgenommenen Datensatz genau die Teile extrahieren, die den im Sägewerk aufgenommenen Daten entsprechen.

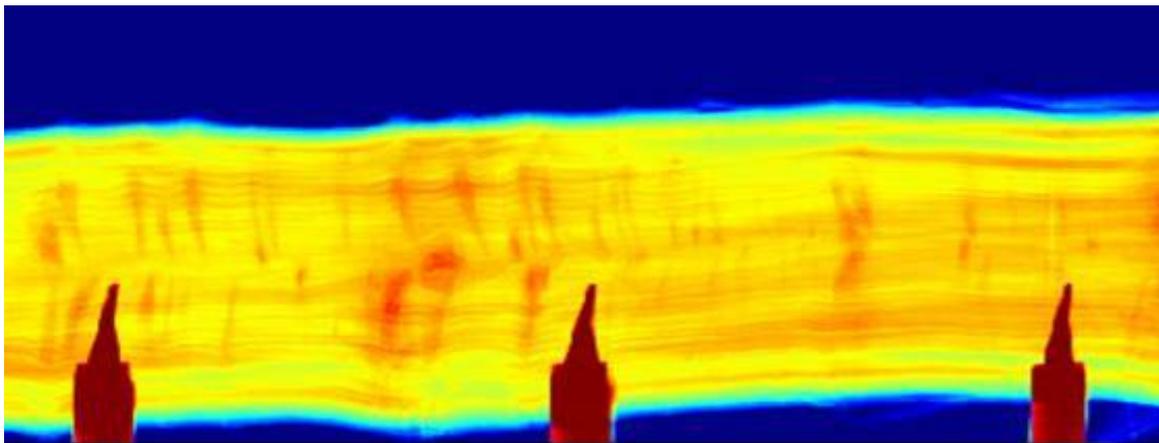


Abbildung 20: Ausschnitt eines Stammabschnitts mit einem Röntgenquellen-Detektor-Paar im Sägewerk aufgenommen

In Abbildung 20 ist ein Teil der Aufnahme eines Stammes aus dem Sägewerk dargestellt. An den metallischen Mitnehmern des Längsförderers (rote Objekte im Bild) ist die Originalaufnahme erkennbar.

Abbildung 21 zeigt denselben Abschnitt in ähnlicher farblicher Darstellung als Simulation mit dem Computertomographen. Wie an den rot-orangefarbenen Bereichen (Ästen) zu erkennen ist, handelt es sich um denselben Abschnitt in der gleichen Orientierung. Auffälligster Unterschied ist das Fehlen der Mitnehmer, da der Stamm im CT an beiden Enden eingespannt wird und nicht auf einem Längsförderer liegt.

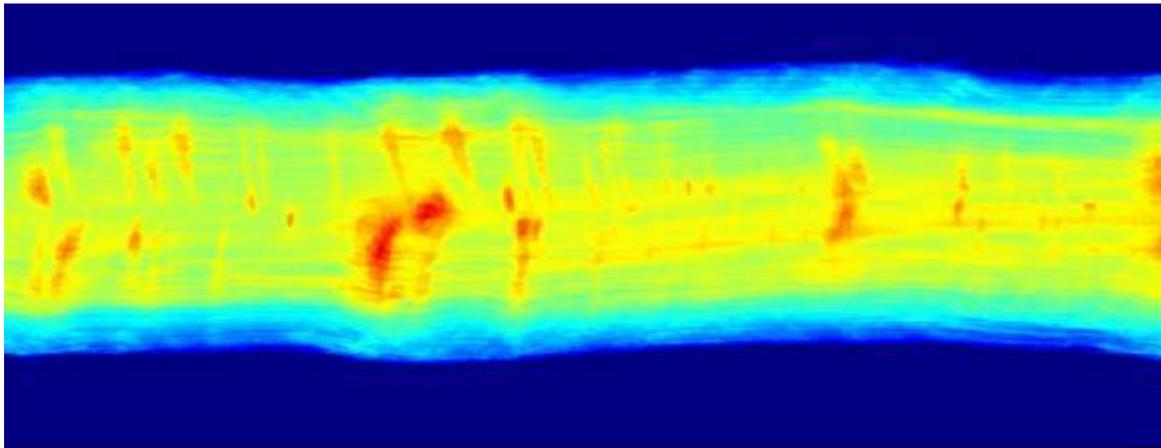


Abbildung 21: Ausschnitt eines Stammabschnitts mit einem Röntgenquellen-Detektor-Paar aus CT-Daten extrahiert

Auf diese mit dem CT simulierten Daten eines diskreten Scanners lassen sich die gleichen Algorithmen wie für die industriellen Scanner anwenden. Nach Anpassungen in der Datenstruktur und der Auswertesoftware können diese Prozeduren zukünftig für weitere Forschungsfragen Verwendung finden wie zum Beispiel für Einschnittsimulation und Ausbeuteoptimierung. Im Rahmen des Projektes war diese Anpassung nicht vorgesehen und mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen nicht durchführbar. In Zukunft lassen sich aber auf diese Art Daten „unter Laborbedingungen“, also ohne die im Sägewerk auftretenden Störungen, aufnehmen und damit mögliche Fehler in den Algorithmen leichter erkennen. Dabei ist natürlich zu beachten, dass auch die Robustheit gegen solche Einflüsse nötig ist.

### 3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Aufgrund der Verzögerung bei der Installation und Inbetriebnahme des Computertomographen und anfänglichen Störungen bei der Datenaufnahme, die gerade bei größeren Stammdimensionen zu unbefriedigenden Datensätzen geführt haben, ließ sich die Entwicklung von Algorithmen zur automatisierten Erkennung der Jahrringbreiten in den CT-Bildern in der zur Verfügung stehenden Zeit nicht bewerkstelligen. Dadurch ließ sich der Vorteil dieser Technologie, die Ermittlung von Vergleichswerten für die maschinelle Jahrringbreitenbestimmung an jedem beliebigen Stammquerschnitt, innerhalb der Projektlaufzeit nicht nutzen.

### 3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)

--

### 3.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung

Im Gesamtfinanzierungsplan des Projektes wurden in Absprache mit den Teilprojekten 1 und 2 folgende Änderungen des Ausgaben- und Zeitplans in Abstimmung mit dem Projektträger vorgenommen:

1. Kostenneutrale Verlängerung von 31.08.08 auf 31.12.08.
2. Die Suche geeigneter Projektpartner gestaltete sich wegen der geringen Anzahl der Anlagen schwierig, wodurch der erste Praxisversuch erst im Juni 2006 stattfinden konnte.
3. Für die Aufnahme der Untersuchungen mit der Computertomographie wurden in Absprache mit dem Projektträger Mittel für wissenschaftliche Hilfskräfte aus TP 2 nach TP 3 verschoben, Gleichzeitig wurden Mittel für wissenschaftliche Hilfskräfte in Personalmittel für wissenschaftliche Angestellte umgewidmet.
4. Installation und Inbetriebnahme des CT verzögerte sich um sechs Monate, wodurch sich der Laborversuch 2007 auf das Ende des Jahres beziehungsweise zum Teil auch ins Jahr 2008 verschob

#### 4 Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht	
3. Titel Produktlinie Nadelstammholz: Automatisierte Erkennung und Bewertung von inneren Holzeigenschaften  im Verbundprojekt „MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung“		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Baumgartner, Rafael Brüchert, Franka Sauter, Udo Hans		5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.12.2008
		6. Veröffentlichungsdatum
		7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg (FVA) Abteilung Waldnutzung Wonnhaldestr. 4 79100 Freiburg		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
		10. Förderkennzeichen 0330616B
		11. Seitenzahl 37
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)  Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn		13. Literaturangaben 29
		14. Tabellen 3
		15. Abbildungen 21
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 53170 Bonn		

## 18. Kurzfassung

Holz ist ein nachwachsender, anisotroper Rohstoff, der sowohl innerhalb eines Bestandes als auch innerhalb eines Stammes zum Teil beträchtliche Schwankungen der Materialeigenschaften aufweisen kann. Um eine nachhaltige, wertschöpfende Verwendung dieses Rohstoffes auch zukünftig gewährleisten zu können, muss den Anforderungen des Marktes nach homogenen Holzprodukten entsprochen werden. Hierfür müssen Systeme in den Beginn der Bereitstellungskette bzw. die erste Bearbeitungsstufe im Sägewerk implementiert werden, die eine Erkennung der äußeren und inneren Eigenschaften und somit eine Zuordnung des Rundholzes in moderne, marktfähige Produkte ermöglichen.

Im Teilprojekt 3 des Verbundprojekts Matchwood wurde der Schwerpunkt dabei auf die Erkennung der Jahrringbreite als einem bedeutsamen Holzmerkmal gelegt, die durch direkte Beziehung zur Dichte ein wichtiger Parameter zur Bestimmung von Tragfähigkeit und Formstabilität von Sägeprodukten darstellt.

In zwei Praxisversuchen in einem Sägewerk in Kärnten, Österreich wurden dabei Algorithmen zur Verarbeitung von Daten eines industriellen Zwei-Ebenen-Röntgenscanners bei gegebener technischer Ausstattung der Anlage auf ihre Präzision getestet und weiterentwickelt.

Im ersten Versuch wurde ein Rundholzkollektiv gewählt, das über Stämme mit sehr großer (> 5 mm) und Stämme mit kleiner, aber mit der vorhandenen Auflösung noch messbarer (2 - 3 mm) Jahrringbreite verfügt. Die Stämme mit breiteren Jahrringen wurden dabei gewählt, da diese Merkmalsausprägung bei Rundholz in den Vorversionen von Algorithmen zu Problemen in der Messpräzision führten, die mit schmalere als Referenz. Manuelle Vergleichsmessungen wurden jeweils an einer Scheibe von der Stock- und der Zopfseite eines jeden Rundholzabschnittes durchgeführt. Wie in Vorversuchen wurden die großen Jahrringbreiten teilweise stark unterschätzt. Dies konnte man zum Teil auf das Phänomen des „after glow“ der Detektoren zurückführen, zum anderen Teil ließ sich allerdings keine Erklärung ermitteln, da in den mittleren Bereichen des Stammes keine Referenzmessung durchgeführt werden konnte. Für den zweiten Praxisversuch wurde deshalb eine zusätzliche Referenzmessung mit einem Computertomographen durchgeführt.

Im zweiten Praxisversuch wurden nur Abschnitte gewählt, die bei den früheren Versuchen zu Problemen geführt haben. Je ein Teilkollektiv mit Dimensionen entsprechend der Stärkkategorie 2a und 3a verfügte über enge Jahrringe (Teilkollektiv I) und über breite Jahrringe (Teilkollektiv II). Ein drittes Teilkollektiv (Teilkollektiv III) bestand aus Stämmen mit großer Dimension und unterschiedlich breiten Jahrringen. Die Abschnitte aus Teilkollektiv I lassen sich mit dem verwendeten Scanner auf Grund der zu geringen räumlichen Auflösung nicht messen. Durch eine Veränderung verschiedener Auswertungsparameter konnte aber nicht die gewünschte Zurückweisung als nicht messbar (Rückgabewert „Jahrringbreite kleiner 3 mm“) erreicht werden. Für die Zukunft ist ein Vorfilter angedacht, der diese Stämme auf Grund des geringeren Kontrasts aussortiert. In Teilkollektiv II konnte im Gegensatz zu den weitringigen Abschnitten in früheren Versuchen eine gute Korrelation erreicht werden. Stämme, bei denen die maschinellen Ergebnisse die manuellen stark unterschätzten, traten hier nicht mehr auf. In Teilkollektiv III konnten nur zum Teil gute Ergebnisse erreicht werden. Eine Ursache für schlechtere Übereinstimmungen ist die Heterogenität der Jahrringe innerhalb eines einzelnen Stammquerschnittes. Um weitere Gründe für die Abweichungen / fehlerbehafteten Messungen zu ermitteln, muss die Auswertung der CT-Daten als Kontrolle für die Daten des industriellen Scanners noch fortgeführt werden, was innerhalb der Projektlaufzeit nicht mehr möglich war.

## 19. Schlagwörter

Röntgenscanner, Computertomographie, Jahrringbreite, Holzmerkmale, Holzeigenschaften, Sägewerk

## 20. Verlag

## 21. Preis

## 5 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Skizze des Zweiebenen-Röntgenscanners Tomolog® .....	252
Abbildung 2: Daten des industriellen Scanners: Längsschnitt eines Stammes von einer der beiden Röntgenquellen .....	252
Abbildung 3: Computertomograph CT.LOG® an der FVA Baden-Württemberg .....	253
Abbildung 4: CT-Daten: a) Stammquerschnitt; b) Längsschnitt nahe der Markröhre; ..... c) Simulation einer feststehenden Röntgenquelle, wie bei einem diskreten Scanner ..	253
Abbildung 5: Versuchsholz Versuch 2008 .....	255
Abbildung 6: Markierung der Messebenen mit Sprühfarbe beim Durchlauf .....	256
Abbildung 7: Markierung durch eine Schraube .....	256
Abbildung 8: Schematische Darstellung des Strahlungsverlaufs von einer Röntgenquelle durch einen Stammquerschnitt .....	257
Abbildung 9: Stammscheibe mit den markierten Messebenen für die manuelle Auszählung .....	258
Abbildung 10: Vergleich der maschinell und manuell ermittelten Ergebnisse für die Jahrringbreite mit unterschiedlichen Parameterkombinationen bei der maschinellen Auswertung (Referenz Mittelwert von Stock- und Zopfscheibe), Versuch 2006 .....	263
Abbildung 11: Vergleich der maschinell und manuell ermittelten Sektorenergebnisse für die Jahrringbreite, Versuch 2006; Parameter wie in Abbildung 10c .....	264
Abbildung 12: Vergleich von manuell ermittelten Jahrringbreiten in Einzelsektoren auf Stock- und Zopfscheibe, Versuch 2006 .....	265
Abbildung 13: Vergleich der maschinellen Ergebnisse bei wiederholtem Durchlauf; Untersuchung der Messkonstanz .....	266
Abbildung 14: Vergleich von manuell ermittelten Jahrringbreiten in Einzelsektoren auf Stock- und Zopfscheibe, Versuch 2008 .....	267
Abbildung 15: Vergleich der maschinell und manuell ermittelten Jahrringbreiten für Einzelsektoren, Versuch 2008 .....	268
Abbildung 16: Vergleich der manuell ermittelten, aggregierten Jahrringbreite auf Stock- und Zopfscheibe, Versuch 2008 .....	269
Abbildung 17: Vergleich der maschinell und manuell ermittelten Gesamtergebnisse für die Jahrringbreite, Versuch 2008 .....	270

Abbildung 18: Vergleich der manuell und der auf den CT-Bildern manuell ermittelten Gesamtergebnisse für die Jahrringbreite, Versuch 2008.....	271
Abbildung 19: Vergleich der maschinell und der auf den CT-Bildern manuell ermittelten Gesamtergebnisse für die Jahrringbreite, Versuch 2008.....	271
Abbildung 20: Ausschnitt eines Stammabschnitts mit einem Röntgenquellen-Detektor-Paar im Sägewerk aufgenommen.....	273
Abbildung 21: Ausschnitt eines Stammabschnitts mit einem Röntgenquellen-Detektor-Paar aus CT-Daten extrahiert.....	274

## 6 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Kennwerte der einzelnen Teilkollektive des Versuchsholzes vom Versuch 2006.....	254
Tabelle 2: Kennwerte des Versuchsholzes vom Versuch 2007.....	254
Tabelle 3: Kennwerte der einzelnen Teilkollektive des Versuchsholzes vom Versuch 2008.....	255

## 7 Literaturverzeichnis

ANDREU, J.-PH., RINNHOFFER, A. (2001): Automatic detection of pith and annual rings on industrial computed tomography log images; Proceedings of the 9th International Conference on Scanning Technology and Process optimization for wood industry - SCAN TECH 2001 – November 4 - 5

ANDREU, J.-PH., RINNHOFFER, A. (2003): Modeling of internal defects in logs for value optimization based on industrial CT scanning, Proceedings of the 5th International Conference on Image Processing and Scanning of Wood, March 23 - 26, 2003, Bad Waltersdorf, Austria, pp. 141 to 150

BENSON-COOPER, D. M., KNOWLES, R. L., THOMPSON, F. J. AND COWN, D. J. (1982): Computed tomographic scanning for the detection of defects within logs”, Forest Research Institute, New Zealand Forest Service

BIRKELAND AND HOLOYEN (1987): Industrial methods for internal scanning of log defects: A progress report on an ongoing project in Norway, Proceedings. 2nd international conference on scanning technology in sawmilling, 1987 October 1 - 2

- BURIAN, B. (2003): Weiterentwicklung der Werksvermessung hinsichtlich der Erfassung und Quantifizierung äußerer und innerer Rundholzmerkmale, Projektabschlußbericht für den Holzabsatzfonds, Bonn
- GUPTA, N. K., SCHMOLDT, D. L., ISAACSON, B. (1998 a): Rational and Application of Tangential Scanning to industrial inspection of hardwood logs, lecture at the FUSION International Conference
- GUPTA, N. K., SCHMOLDT, D. L., ISAACSON, B. (1998 b): Tangential scanning of hardwood logs: developing an industrial computer tomography scanner, lecture at the Eleventh International Symposium on Nondestructive Testing of Wood, September 9 - 11 1998, Madison, Wisconsin
- HAUFFE, P. (2001): Weiterentwicklung der automatisierten Werksvermessung hinsichtlich der Erfassung und Quantifizierung äußerer und innerer Rundholzmerkmale, Interner Projektabschlußbericht des Holzabsatzfonds, Bonn
- HAUFFE, P. (2002): Erkennung der inneren Holzqualität bei der Werkeingangsvermessung, Poster auf der Frühjahrstagung der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg im Europapark Rust
- HAUFFE, P. (2004): Weiterentwicklung der automatisierten Rundholzvermessung hinsichtlich der Erfassung und Quantifizierung äußerer und innerer Holzeigenschaften, Freiburger Forstliche Forschung – Berichte, Band 52, Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität Freiburg – Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
- HAUFFE, P.; MAHLER, G.; WURSTER, M. (2000) : Bewertung der inneren Holzqualität wird erprobt. HZBL 105; S. 1318-1319
- HAUFFE, P.; MAHLER, G. (2000): Evaluation of internal log quality using X-ray and Ultrasound. Proceedings of the 12th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood“; 13-15 September, Sopron, Ungarn
- INVISION (2004): Internetseite: [www.invision-tech.com](http://www.invision-tech.com) (mittlerweile von GE aufgekauft)
- KAISER, R., MAHLER, G. UND WURSTER, M. (2000) Neuerungen der Werksvermessung von Stammholz, Holz-Zentralblatt 126, S. 1707
- KAISER, R. (2004): Weiterentwicklung des Anforderungskataloges für die Werksvermessung von Stammholz, Freiburger Forstliche Forschung – Berichte, Band 52, Forstwissenschaftliche Fakultät der Universität Freiburg – Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg
- LEENEN, M. (2003): Vermessung von Rundholz in Rinde mit Röntgentechnologie, Interner (1.) Projekt - Zwischenbericht für den Holzabsatzfonds, Bonn

- MEDVED, S.; BUDNAR, M.; PIRKMAIER, S. (1998): Ermittlung des Feuchtigkeitsprofils von Spanplatten mit Gammastrahlen; Holzforschung und Holzverwendung, Wien; Heft 1; S.7 bis 10
- MICROTEC (2004): Internetseite: <http://www.microtec.eu/>
- OJA, J., FREDERISSKON, J., GRUNDBERG, S., BERG, P. (2003): Automatic grading of sawlogs – industrial experiences from x-ray scanning and optical 3D scanning, Proceedings from the 5th International Conference on Image Processing and Scanning of Wood, march 23 - 26, 2003, Bad Waltersdorf, Austria, S. 107 to 113
- PETERS, W. (1989): Mineralische Bestandteile in Spanplatten und ihre Ortung durch Röntgenaufnahmen; Holz-Zentralblatt 48; S. 762
- RINNHOFER, A., PETUTSCHNIGG, A., ANDREU, J. PH. (2000): Einsatz hochauflösender Röntgen-Computertomographie für den optimierten Rundholz – Einschnitt, Vortrag im Rahmen der Grazer Holzfachtagung 2000, TU Graz Austria
- SCHMOLDT, D. L., ARAMANN, P. A. (1996 a): Interactive simulation of hardwood log veneer slicing using CT images, Forest Products Journal 46 (1), pp. 41 to 47
- SCHMOLDT, D. L., LI, P., ABBOTT, A. L. (1996 b): CT imaging of hardwood logs for lumber production, Proceedings of the 5th Industrial Engineering research Conference, Minneapolis, Minnesota, May 18-20, 1996, pp. 387 to 392
- SCHMOLDT, D. L.; OCCENA, L. G.; ABBOTT, A. L.; GUPTA, N. K. (1999a): Nondestructive evaluation of hardwood logs: CT Scanning, Machine vision and data utilization. Nondestr. Test. Eval., Vol. 15, pp. 279 to 309
- SCHMOLDT, D. L.; GUPTA, N. K.; SKATTER, S.; CHEMOUNI, S. (1999b): Industrial CT – Hardwood logsanner development; <http://www.rsr4702.forprod.vt.edu/unit/logscan.htm>
- WILWERDING, A., KARLSSON, M., MAHLER, G. (2001) : Rundholzvermessung und Qualitätsermittlung mit Röntgentechnologie, Holz-Zentralblatt 78, S. 1036 - 1037
- WIMMER, R.; OAULUS, M. SIQUN, W. (2003): Determination of strand – orientation profiles in OSB using x-ray computed tomography; Proceedings of the 5<sup>th</sup> International Conference on Image Processing and Scanning of Wood; March 23 to 26, 2003; Bad Waltersdorf; Austria; p. 187
- WURSTER, M. (2001a): Anforderungen für die Werksvermessung erweitert, Holz-Zentralblatt 42, S. 599
- WURSTER, M. (2001b): Werkeingangsmaß - Blackbox oder vertrauenswürdige Maß?, AFZ – Der Wald 21, S.1102 ff

# Teilprojekt 4:

## Produktlinie Nadelindustrieholz: Produktspezifische Holzqualitätsanforderungen und ihre Erfassung

Institut für Forstbenutzung und Forstliche  
Arbeitswissenschaft

Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

## Schlussbericht

Zuwendungsempfänger: Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg	Förderkennzeichen: 0330616A
Vorhabenbezeichnung:  MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung  Teilprojekt 4: Nadelindustrieholz: Produktspezifische Holzqualitätsanforderungen und ihre Erfassung zur Papierherstellung  Götz Martin	
Laufzeit des Vorhabens:  1. September 2005 bis 31. Dezember 2008	
Berichtszeitraum:  1. September 2005 bis 31. Dezember 2008	

## **MatchWood - Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung**

### **Teilprojekt 4: Nadelindustrieholz: Produktspezifische Holzqualitätsanforderungen und ihre Erfassung zur Papierherstellung**

Götz Martin

Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft, Universität Freiburg

Freiburg, Juni 2009

## **Inhaltsverzeichnis**

<b>1</b>	<b>Kurze Darstellung des Teilvorhabens</b>	<b>286</b>
1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung	286
1.2	Vorraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde	286
1.3	Planung und Ablauf des Vorhabens	287
1.4	Wissenschaftliche und technische Anknüpfung	288
1.5	Zusammenarbeit mit anderen Stellen	288
<b>2</b>	<b>Eingehende Darstellung</b>	<b>288</b>
2.1	Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans	288
2.2	Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen	288
2.3	Erfolgte und geplante Veröffentlichungen	288
<b>3</b>	<b>Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht</b>	<b>289</b>
3.1	Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms	289
3.2	Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen	289
3.3	Fortschreibung des Verwertungsplans	290
3.4	Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	290
3.5	Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)	290

---

3.6	Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung	290
<b>4</b>	<b>Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)</b>	<b>291</b>

# 1 Kurze Darstellung des Teilvorhabens

## 1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Im Verbundprojekt sollten im Rahmen einer Prozessoptimierung die Materialströme und die begleitenden Informationsströme zwischen Wald und Holzindustrie in geeigneter Form und unter Einsatz moderner Informationstechnologien organisiert, aufeinander abgestimmt und optimiert werden. Das übergeordnete Hauptziel war es, für spezifische Produkte und Produktionsverfahren der Holzindustrie das jeweils am besten geeignete Rohholz zum vereinbarten Zeitpunkt in der erforderlichen Menge und unter möglichst geringen Umweltbelastungen zu wettbewerbsfähigen Kosten bereit zu stellen.

Aus diesem Gesamtziel ergeben sich folgende wissenschaftliche und technische Arbeitsziele:

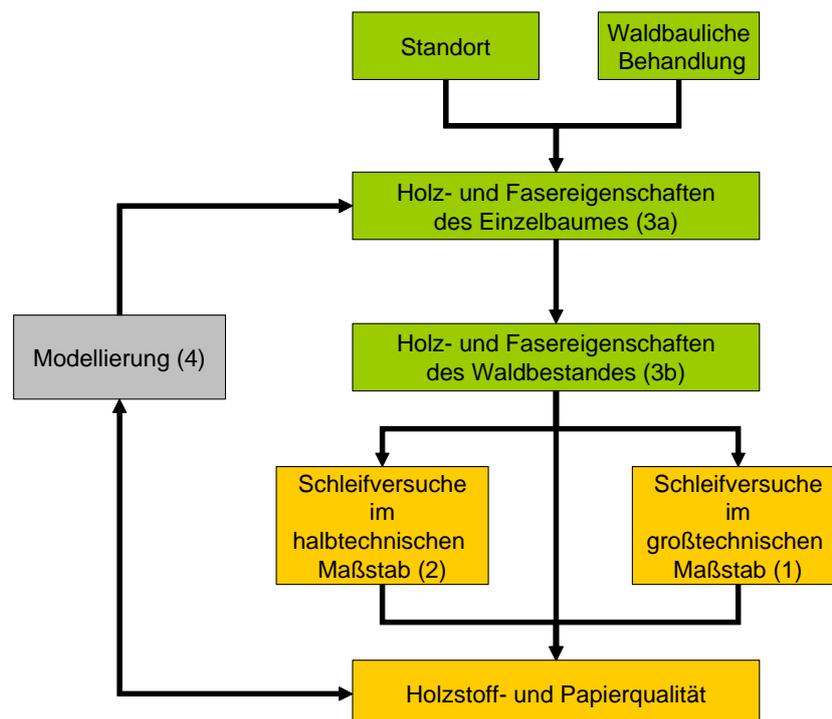
- Charakterisierung der Auswirkung unterschiedlicher Wuchsbedingungen auf die für die Papierindustrie relevanten Holz- und Fasereigenschaften der Baumart Fichte mit Hilfe neuer und innovativer Messmethoden,
  - Erarbeitung von vertieften Erkenntnissen über den Einfluss von Holz- und Fasereigenschaften auf die Holzstoff- und Papierqualität bei konstanten Produktionsbedingungen,
  - Entwicklung von Ansätzen und Konzepten zur Regionalisierung bzw. Lokalisierung spezifischer Holz- und Fasereigenschaften für unterschiedliche holzhaltige Papiersorten,
- Erarbeitung von Konzepten und Instrumenten für eine effektive und effiziente Erkennung und Steuerung der relevanten Holz- und Fasereigenschaften im Rahmen der Forst-Holz-Bereitstellungskette, d.h. bei der Gestaltung des Holzeinkaufes und der Holzbereitstellung im Wald, wie auch bei der Stoffstromlenkung am Werkseingang der aufnehmenden Papierfabriken.

## 1.2 Voraussetzungen unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Aus den im Projekt zur Verfügung stehenden Mitteln konnte eine Wissenschaftlerstelle mit der Hälfte der regelmäßigen Arbeitszeit und eine ebensolche Stelle einer wissenschaftlichen Hilfskraft besetzt werden. Der wissenschaftliche Mitarbeiter hat die Koordination des Projektes und die Anweisung der Hilfskräfte (Stelle wurde auf mehrere Mitarbeiter aufgegliedert) übernommen.

### 1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit sollen Zusammenhänge zwischen unterschiedlichen Holz- und Fasereigenschaften des Rohstoffes Fichtenindustrieholz und der Qualität von mit dem Steinschliffverfahren hergestelltem, holzhaltigem Magazinpapier untersucht werden. Dabei sollen einerseits grundlegende Zusammenhänge erarbeitet und andererseits daraus für die Praxis relevante Schlussfolgerungen abgeleitet werden. Dazu wurde ein Untersuchungskonzept entwickelt, welches sich aus vier verschiedenen Einzeluntersuchungen zusammensetzt (Abb. 1).



**Abb. 1: Untersuchungskonzept**

Die zentrale Versuchsreihe der vorliegenden Forschungsarbeit bildeten in großtechnischem (industriellem) Maßstab mit Fichtenindustrieholz durchgeführte Schleifversuche in der Papierfabrik STORA ENSO REISHOLZ (1). Aufgrund möglicher, im großtechnischen Versuch nur schwer kontrollierbarer betrieblicher Einflüsse wurden die Betriebsversuche durch Schleifversuche im Labormaßstab am Institut für Papierfabrikation und mechanische Verfahrenstechnik der TU Darmstadt ergänzt und validiert (2).

Vorgelagert war (3) eine Untersuchungsreihe am Rohholz, bei der eine detaillierte Erfassung der relevanten Holz- und Fasereigenschaften in Abhängigkeit von den gegebenen Standortsbedingungen, der Wuchsgeschwindigkeit und des kambialen Alters mit Hilfe bekannter und neuer, innovativer Messmethoden erfolgte.

Anhand der dabei gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse wurden in dem vierten Untersuchungsabschnitt (4), Modelle für relevante Holzstoff- und Papiereigenschaften anhand in der Praxis vorliegender bzw. leicht erfassbarer Rohholzparameter entwickelt.

#### **1.4 Wissenschaftliche und technische Anknüpfung**

#### **1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen**

Das TP 4 Nadelindustrieholz wurde in Kooperation mit dem Unternehmen Stora Enso durchgeführt, im speziellen mit Stora Enso Wood Supply Central Europe (verantwortlich für die Bereitstellung der verarbeitenden Nadelindustrieholzes) und der Papierfabrik Stora Enso Reisholz in Duesseldorf.

## **2 Eingehende Darstellung**

### **2.1 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit im Sinne des Verwertungsplans**

Das vorliegende Forschungsprojekt trägt durch eine Optimierung der Holzbereitstellungskette zwischen Wald und Papierfabrik dazu bei, dass die Papierindustrie in die Lage versetzt wird, die Qualität ihrer Produkte und die Effizienz ihrer Produktionsprozesse durch einen qualitätsorientierten Einsatz des Rohstoffes Fichtenindustrieholz zu verbessern.

### **2.2 Während der Durchführung bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen**

Keine

### **2.3 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen**

Die Ergebnisse des TP4 Nadelindustrieholz wurden im Rahmen des Promotionsverfahrens von Götz Martin im Juli 2008 als online Publikation an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg veröffentlicht

### 3 Kurzgefasster Ergebniskontrollbericht

#### 3.1 Beitrag zu den förderpolitischen Zielen des Förderprogramms

Siehe Dachprojekt

#### 3.2 Wissenschaftlich-technisches Ergebnis, Nebenergebnisse und wesentliche Erfahrungen

Die holzverarbeitende Papier- und Zellstoffindustrie Europas steht in zunehmendem internationalem Wettbewerb. Sie kann ihre heute noch führende Position nur dann erhalten, wenn sie hinsichtlich Produktpalette, Leistungsfähigkeit und Kostengestaltung permanente Fortschritte erzielt. Aus diesen Gründen besteht die Herausforderung darin, Produkte mit besserer und homogener Qualität kosteneffizient herzustellen. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Papierqualität und der Produktionseffizienz ist der Einsatz von Fichtenindustrieholz mit möglichst eng und produktspezifisch definierten Holz- und Fasereigenschaften. Damit besteht speziell bei der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) die Möglichkeit, den aufnehmenden Papierfabriken den best angepassten Rohstoff zum richtigen Zeitpunkt in der erforderlichen Qualität und Menge bereitzustellen, da die Fichte in den unterschiedlichsten Klima- und Standortverhältnissen vorkommt und sich ihre Holz- und Fasereigenschaften aus verschiedenen Beständen daher deutlich unterscheiden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde mit Hilfe von groß- und halbtechnischen Schleifversuchen die Rückwirkung unterschiedlicher Merkmale der äußeren und inneren Holzqualität auf die Herstellung und die Qualität von Holzstoff und Papier untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Holz- und Fasereigenschaften des eingesetzten Rohstoffes bei konstanten Produktionsbedingungen deutlich auf die Qualität des hergestellten Holzstoffes und Papiers auswirken. Die Holzeigenschaften mit dem größten Einfluss sind dabei das physiologische Alter und die Jahrringbreite des verarbeiteten Papierholzes, da sich diese beiden Holzeigenschaften signifikant auf weitere Holz- und Fasereigenschaften wie z.B. den Faserdurchmesser oder die Zellwandstärke auswirken. Allerdings bestehen zwischen den Rohstoff- und den Produkteigenschaften keine einfachen sondern durchweg komplexe Zusammenhänge. Diese komplexen Zusammenhänge können mit Hilfe von Modellen, welche aus multiplen Regressionsanalysen entwickelt wurden, mit zufrieden stellender Sicherheit dargestellt werden. Die Ergebnisse dieser Modelle zeigen, dass sich älteres Holz mit einer durchschnittlich niedrigen Jahrringbreite positiv auf die Festigkeitseigenschaften und den spezifischen Energieverbrauch während der

Holzstoffproduktion auswirkt. Die optischen Eigenschaften, im Speziellen der Weißgrad von Papier, werden von diesen genannten Holzeigenschaften dagegen eher negativ beeinflusst.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen weiterhin, dass die Holzstoff- und Papierqualität homogenisiert und verbessert werden kann, wenn im Rahmen des Holzeinkaufes gezielt Papierholz mit den von der aufnehmenden Papierfabrik gewünschten Holz- und Fasereigenschaften eingekauft wird. Dies ist aber aufgrund der heute gegebenen technischen Voraussetzungen und der zum Teil fehlenden Informationen über den stehenden Holzbestand und seine technischen und wirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten noch nicht möglich. Ein erster alternativer Ansatz ist die Sortierung des eingehenden Papierholzes am Holzplatz der aufnehmenden Papierfabrik anhand der Jahrringbreite. Die unterschiedlichen Papierholzsortimente können dann entsprechend den Produktanforderungen in einem spezifizierten Verhältnis eingesetzt werden.

### **3.3 Fortschreibung des Verwertungsplans**

### **3.4 Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben**

### **3.5 Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer (z.B. Anwenderkonferenzen)**

Neben wissenschaftlichen Konferenzen wurden die Ergebnisse auf den einmal jährlich stattfindenden Projekttreffen mit dem Anwender- und Stakeholderpanel diskutiert.

### **3.6 Einhaltung der Ausgaben- und Zeitplanung**

Die Ausgaben – und Zeitplanung des TP4 Nadelindustrieholz wurden eingehalten

#### 4 Kurzfassung des wesentlichen fachlichen Inhalts (Berichtsblatt)

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung)	
	Schlussbericht	
3. Titel		
<p>Nadelindustrieholz: Produktspezifische Holzqualitätsanforderungen und ihre Erfassung zur Papierherstellung</p> <p>im Verbundprojekt „MatchWood – Vom Baum zum Produkt: Wertschöpfung durch Prozessoptimierung im Rahmen naturnaher Waldbewirtschaftung“</p>		
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)]		5. Abschlussdatum des Vorhabens
Martin, Götz		31.12.2008
		6. Veröffentlichungsdatum
		Juli 2008
		7. Form der Publikation
		Dissertation
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse)		9. Ber. Nr. Durchführende Institution
<p>Institut für Forstbenutzung und Forstliche Arbeitswissenschaft</p> <p>Albert-Ludwigs-Universität Freiburg</p> <p>Werthmannstraße 6</p> <p>79085 Freiburg</p>		
		10. Förderkennzeichen
		0330616A
		11. Seitenzahl
		176
12. Fördernde Institution (Name, Adresse)		13. Literaturangaben
<p>Bundesministerium</p> <p>Bildung und Forschung (BMBF)</p> <p>53170 Bonn</p>		150
		14. Tabellen
		30
		15. Abbildungen
		58
16. Zusätzliche Angaben		
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum)		
Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF), 53170 Bonn		

## 18. Kurzfassung

Die Holzverarbeitende Papier- und Zellstoffindustrie Europas steht in zunehmendem internationalem Wettbewerb. Sie kann ihre heute noch führende Position nur dann erhalten, wenn sie hinsichtlich Produktpalette, Leistungsfähigkeit und Kostengestaltung permanente Fortschritte erzielt. Aus diesen Gründen besteht die Herausforderung darin, Produkte mit besserer und homogener Qualität kosteneffizient herzustellen. Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Papierqualität und der Produktionseffizienz ist der Einsatz von Fichtenindustrieholz mit möglichst eng und produktspezifisch definierten Holz- und Fasereigenschaften. Damit besteht speziell bei der Fichte (*Picea abies* (L.) Karst.) die Möglichkeit, den aufnehmenden Papierfabriken den best angepassten Rohstoff zum richtigen Zeitpunkt in der erforderlichen Qualität und Menge bereitzustellen, da die Fichte in den unterschiedlichsten Klima- und Standortverhältnissen vorkommt und sich ihre Holz- und Fasereigenschaften aus verschiedenen Beständen daher deutlich unterscheiden.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde mit Hilfe von groß- und halbtechnischen Schleifversuchen die Rückwirkung unterschiedlicher Merkmale der äußeren und inneren Holzqualität auf die Herstellung und die Qualität von Holzstoff und Papier untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass sich die Holz- und Fasereigenschaften des eingesetzten Rohstoffes bei konstanten Produktionsbedingungen deutlich auf die Qualität des hergestellten Holzstoffes und Papiers auswirken. Die Holzeigenschaften mit dem größten Einfluss sind dabei das physiologische Alter und die Jahrringbreite des verarbeiteten Papierholzes, da sich diese beiden Holzeigenschaften signifikant auf weitere Holz- und Fasereigenschaften wie z.B. den Faserdurchmesser oder die Zellwandstärke auswirken. Allerdings bestehen zwischen den Rohstoff- und den Produkteigenschaften keine einfachen sondern durchweg komplexe Zusammenhänge. Diese komplexen Zusammenhänge können mit Hilfe von Modellen, welche aus multiplen Regressionsanalysen entwickelt wurden, mit zufrieden stellender Sicherheit dargestellt werden. Die Ergebnisse dieser Modelle zeigen, dass sich älteres Holz mit einer durchschnittlich niedrigen Jahrringbreite positiv auf die Festigkeitseigenschaften und den spezifischen Energieverbrauch während der Holzstoffproduktion auswirkt. Die optischen Eigenschaften, im Speziellen der Weißgrad von Papier, werden von diesen genannten Holzeigenschaften dagegen eher negativ beeinflusst.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit zeigen weiterhin, dass die Holzstoff- und Papierqualität homogenisiert und verbessert werden kann, wenn im Rahmen des Holzeinkaufes gezielt Papierholz mit den von der aufnehmenden Papierfabrik gewünschten Holz- und Fasereigenschaften eingekauft wird. Dies ist aber aufgrund der heute gegebenen technischen Voraussetzungen und der zum Teil fehlenden Informationen über den stehenden Holzbestand und seine technischen und wirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten noch nicht möglich. Ein erster alternativer Ansatz ist die Sortierung des eingehenden Papierholzes am Holzplatz der aufnehmenden Papierfabrik anhand der Jahrringbreite. Die unterschiedlichen Papierholzsortimente können dann entsprechend den Produkthanforderungen in einem spezifizierten Verhältnis eingesetzt werden.

## 19. Schlagwörter

Holzschlifferzeugung; Papiereigenschaften; Holzschliffeigenschaften; Holz- und Fasereigenschaften; *Picea abies*; Papierholzbereitstellung

## 20. Verlag

Online-Publikation; Universitätsbibliothek Freiburg i. Breisgau

## 21. Preis