Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung

Untersuchungen zur zerstörungsfreien Strukturanalyse von Forstpflanzen

Alexander Riedel

Vollständiger Abdruck der vom Promotionsausschuss der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement an der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr. rer. silv.

genehmigten Dissertation.

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr. R. Mosandl
2. Prof. Dr. H. Pretzsch
3. Prof. Dr. B. Koch

Die Dissertation wurde durch den Promotionsausschuss der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement an der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 06.02.02 angenommen. Datum der mündlichen Prüfung: 23.04.02.

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand am Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung der Technischen Universität München im Rahmen des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft geförderten Sonderforschungsbereichs 607. Die Betreuung übernahm Prof. Dr. R. Mosandl. Ihm gilt mein Dank für das in mich gesetzte Vertrauen, selbständig ein im Bereich der Forstwissenschaft eher neuartiges, aber gerade deswegen sehr interessantes Forschungsprojekt wie das vorliegende bearbeiten zu können. Dabei hatte ich immer ausreichend Freiraum, aber auch seine Rückendeckung, bei der Ausgestaltung meiner Forschungsarbeiten.

Ich möchte hier darauf verzichten, allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für Waldbau und Forsteinrichtung einzeln meinen Dank auszusprechen. Vielmehr soll an dieser Stelle der gesamten Mannschaft gedankt werden für eine abwechslungsreiche und nicht zuletzt oftmals auch unterhaltsame Zeit während der Projektbearbeitung. Selbst wenn die fachlichen Probleme aufgrund der Thematik gelegentlich etwas ausgefallen waren, so hatte doch jeder einzelne Mitarbeiter immer ein offenes Ohr dafür. Nicht selten kamen gerade auf diese Weise die besten Lösungsansätze zustande. Abseits von allen fachlichen Aspekten empfand ich vor allem das stets entspannte Arbeitsklima als sehr erfrischend, so dass bei allem der Humor nicht auf der Strecke blieb.

Auch von außerhalb des Lehrstuhls kamen zahlreiche Hilfestellungen für die Themenbearbeitung. Neben den im SFB beteiligten Kolleginnen und Kollegen sind hier in erster Linie die mit verwandten Problemstellungen befassten Forscher zu nennen, welche immer bereit waren, mich mit ihren Erfahrungen zu unterstützen. Stellvertretend seien hier Hervé Sinoquet, Patrick Reidelstürz und Tomislav Hengl genannt. Auch die Mitarbeiter der Firmen Eos Systems und Dimension3D, deren Produkte ich im Rahmen dieser Arbeit einsetzte, und die immer bereit waren, auf die in ihren Augen sicherlich gelegentlich etwas ungewöhnlichen Probleme einzugehen, sollen nicht unerwähnt bleiben.

Der Deutschen Forschungsgemeinschaft gilt mein Dank für die Finanzierung des Forschungsprojektes.

Last but not least möchte ich an dieser Stelle meinen aufrichtigen Dank für die unzählbaren und unverzichtbaren größeren und kleineren Hilfestellungen aller Art aussprechen, durch die Familie, Kollegen sowie Freundinnen und Freunde zum Entstehen dieser Arbeit beigetragen haben.

Inhaltsverzeichnis

I Einleitung....1

1 Problemstellung....1
2 Einbindung in den Sonderforschungsbereich 607....2
3 Zielsetzung und Vorgehensweise....3

II Evaluierung existierender Messverfahren zur räumlichen Datenerfassung....5

1 Methodische Grundlagen der Evaluierung....5
1.1 Besonderheiten der räumlichen Erfassung von Pflanzen....5
1.2 Strukturierung des zu erfassenden Datenmaterials....6
1.2.1 Einteilung nach messtechnischen Kriterien....7
1.2.2 Einteilung nach der Verwendung der erfassten Daten....9
1.3 Kriterien für die Evaluierung von Messverfahren....9
1.4 Anwendungsgebiete automatisierter 3D-Messmethoden....11
2 Methoden der dreidimensionalen Datenerfassung....13
2.1 Räumliche Messverfahren im Überblick....13
2.2 Detailinformationen zu den einzelnen Messverfahren....14
2.2.1 Manuelle Vermessung....14
2.2.2 Messung mit Magnetfeldern....15
2.2.3 Messungen mit Schall....17
2.2.4 Tomographische Methoden und Radar....19
2.2.5 Aktive optische Verfahren....21
2.2.5.1 Laser und Weißlicht....21
2.2.5.2 Einsatz von strukturiertem Licht....23
2.2.6 Passive optische Verfahren - Photogrammmetrie....24
2.2.6.1 Einsatzgrundsätze der Photogrammmetrie....24
2.2.6.2 Eignung der Photogrammmetrie für die Pflanzenvermessung....33
2.2.6.3 Einzelbildauswertung....35
2.2.6.4 Stereophotogrammmetrie (Zweibildauswertung)....35
2.2.6.5 Mehrbildauswertung (photogrammmetrische Triangulation)....37
2.2.6.6 Volumen- beziehungsweise Silhouettenschnitt....40
3 Ergebnisse der Evaluierung....42
4 Diskussion der Evaluierung....44

III Einsatz zweier ausgewählter photogrammmetrischer Methoden zur Pflanzenvermessung....46

1 Die ausgewählten Verfahren: Silhouettenschnitt und Mehrbildtriangulation....46
2 Untersuchungen zum Volumenschnitt....47
2.1 Material und Methoden....47
2.1.1 Pflanzenmaterial und händische Vergleichsmessung....47
2.1.2 Methodik der photogrammmetrischen Aufnahme....48
2.1.2.1 Hard- und Software....48
2.1.2.2 Vorgehensweise bei der Pflanzenvermessung....50
2.1.2.3 Auswertung der 3D-Daten....58
2.2 Ergebnisse....59
2.2.1 Umfang des zu verarbeitenden Datenmaterials....59
2.2.2 Zeitliche Gesichtspunkte....60
2.2.3 Messgenauigkeit....61
2.3 Schlussfolgerungen....63

3 Untersuchungen zur Mehrbildtriangulation....64
3.1 Material und Methoden....64
3.1.1 Pflanzenmaterial und händische Vergleichsmessung....64
3.1.2 Methodik der photogrammmetrischen Aufnahme....64
3.1.2.1 Fotografische Ausrüstung....64
3.1.2.2 EDV-Ausstattung....66
3.1.2.3 Vorgehensweise bei der Pflanzenvermessung....68
3.2 Methodik der Datenauswertung....78
3.2.1 Datenauswertung mit handelsüblicher Software....78
3.2.2 Strukturanalyse mit speziell entwickelter Software....79
3.2.2.1 Datenmodell für die Speicherung der räumlichen Strukturdaten....80
3.2.2.2 Grundlegene Benutzung der Analysesoftware....83
3.2.2.3 Algorithmen und Grundstrukturen der Analysesoftware....89
3.2.3 Auswertung von Körperdaten und Biomassewerten....102
3.2.3.1 Durchmesser....102
3.2.3.2 Möglichkeiten zur Gewinnung von Biomassedaten....103
3.3 Ergebnisse....104
3.3.1 Messergebnisse....104
3.3.2 Messgenauigkeit....107
3.3.2.1 Ursachen für Ungenauigkeiten bei der Mehrbildtriangulation....107
3.3.2.2 Quantifizierung der im praktischen Einsatz auftretenden Fehler....109
3.3.3 Zeitliche Aspekte....117
3.4 Schlussfolgerungen....118
3.4.1 Diskussion der Datenerhebung....118
3.4.2 Diskussion des Ansatzes zur Strukturanalyse....119
3.4.3 Ausblick....120

IV Empfehlungen für den praktischen Einsatz zerstörungsfreier räumlicher Messmethoden....121

1. Wahl eines geeigneten Verfahrens....121
2. Einsatz der Mehrbildtriangulation....122
3. Ausblick....124

V Zusammenfassung....125

Abstract in Deutsch....125
Abstract in English....126

VI Quellenangaben....127

Literatur....127
Internet-URLs....132

VII Anhang....134

Anhang A: Programmfunktionen der Analysesoftware....134
Anhang B: Hinweise für den Einsatz des Programmes....139
Anhang C: Programmquellcode....140

I Einleitung

1 Problemstellung

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, ein Verfahren zur zerstörungsfreien räumlichen Analyse von Baumstruktur und Biomasseverteilung forstlicher Baumpflanzen zu entwickeln. Für prinzipiell ähnliche Aufgabenstellungen zur non-destruktiven dreidimensionalen Erfassung und Vermessung von unterschiedlichen Objekten werden in zahlreichen Branchen seit längerem Verfahren der digitalen Bildanalyse mit Erfolg eingesetzt. Diese haben dort gerade in den letzten Jahren als Möglichkeit zur quantitativen und qualitativen Erfassung zunehmend an Bedeutung gewonnen (ABW, 1999; AICON, 1999). Sie ermöglichen es, komplexe Analysen in standardisierter Form zeit- und kostensparend durchzuführen. Die Einsatzbereiche der verwendeten Verfahren reichen dabei von der Objekt- und Mustererkennung, der hochpräzisen Segmentierung und Vermessung bis hin zu den verschiedensten Multimediaapplikationen. Der rasante technische Fortschritt sowohl im Hard- als auch im Softwarebereich erschließt dabei immer neue Einsatzoptionen.

Im Forstbereich steckt die Verwendung der digitalen Bildanalyse bislang zwar teilweise noch in ihren Anfängen, aber auch hier finden derartige Verfahren, zumindest im zweidimensionalen Bereich, in den letzten Jahren zunehmend Verwendung. Neben dem Einsatz im Bereich der Fernerkundung (Luftbildauswertung) steht dabei zunehmend auch der Nahbereich im Zentrum des Interesses, so zum Beispiel bei der Erfassung der Oberflächenstrukturen von Holz und Holzprodukten: ZHANG et al. (1994) nutzten Bildanalyseverfahren zur Untersuchung der Oberflächen von Faserplatten, SUGIMORI (1995) sowie LEPETIT et al. (1990) zur Charakterisierung von Holzoberflächen und BUTLER et al. (1993) für die Fehlererkennung bei Holzfurnieren. GJERDRUM et al. (2001) berichten über den Einsatz eines 3D-Scanners zur Qualitätssortierung (Krümmungsmessung) bei Rundholz. Ein weiterer Bereich, in dem sich die digitale Bildanalyse bereits als wichtiges Verfahren etabliert hat, ist die Ermittlung von Überschirmungsgraden und Beleuchtungsverhältnissen in Beständen (WAGNER, 1994; WAGNER und NAGEL, 1992). Gerade hierzu wurden am Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung der Technischen Universität München bereits umfangreiche Untersuchungen getätigt (AMMER, 2000).

Auch für ähnliche Fragestellungen, wie sie Gegenstand des vorliegenden Forschungsprojektes sind, wurden teilweise bereits zweidimensionale bildanalytische Verfahren erprobt. BLASCHKE et al. (1985) nutzten bei ihren Untersuchungen ein interaktives Bildauswertesystem für die Bestimmung morphometrischer Kenngrößen (Länge, Fläche, Umfang und Anzahl von Segmenten) von Feinwurzelsystemen. Die Auswertung von Mikrovideobildern von Feinwurzeln mittels elektronischer Bildverarbeitung ist weit verbreitet. So erprobten ODDIRAJU et al. (1994) dieses Verfahren für die Klassifizierung und Vermessung (Kennwerte wie Feinwurzeloberflächen, Grob-/Feinwurzel-Relationen) von Stecklingswurzeln. HOOKER et al. (1992) bestimmten in ihren Untersuchungen Wurzellänge und Wurzelverzweigungen sowie den Umfang von Pilzkolonisation. Weitere Beispiele für den Einsatz digitaler Bildauswertung zur Bestimmung morphologischer Eigenschaften von Pflanzen beziehungsweise Pflanzenteilen finden sich bei BORN (1990), BURKE und LEBLANC (1988), DIEBOLT und MUDGE (1988), PRICE und OSBORNE (1990) sowie DANJON et al. (2000).

Durch die genannten Studien wird somit nachgewiesen, dass unterschiedliche Verfahren der digitalen Bildanalyse nicht nur im industriellen Bereich einsetzbar sind, sondern grundsätzlich auch für

die Bestimmung morphometrischer Pflanzenkenngrößen geeignet sind. Aber es hat sich ebenfalls gezeigt, dass eine direkte Umsetzung der in der Industrie verfügbaren Messtechniken auf die komplexen organischen Strukturen von Pflanzen teilweise schwer bis gar nicht machbar ist. So beschränken sich die bisherigen Anwendungen meist auf die Erfassung von Teilausschnitten von Pflanzen oder auf ein eng begrenztes Set von Kenngrößen. Für die bildhafte Erfassung der jeweiligen Untersuchungsobjekte werden zudem meist nur zweidimensionale Scan- beziehungsweise Digitalisierverfahren genutzt, wobei naturgemäß die für diverse wissenschaftliche Fragestellungen interessanten raumrelevanten Informationen verloren gehen.

Insbesondere für die längerfristige Untersuchung mehrjähriger Forstpflanzen, wie sie im Rahmen zahlreicher Untersuchungen anfallen, sind die bislang existierenden Verfahren deshalb wenig geeignet, da hier die Kennwerte der Gesamtpflanze sowie deren Raumbesetzung möglichst umfassend und in wenig gestörtem Zustand erfasst werden sollen. Dies gilt insbesondere hinsichtlich der angestrebten dreidimensionalen Auswertung ganzer Pflanzen mit einem umfangreichen Set quantitativer und qualitativer Zielparameter.

2 Einbindung in den Sonderforschungsbereich 607

Die in der vorliegenden Arbeit durchgeführten Untersuchungen sind als Teilprojekt B3 Bestandteil des seit 1998 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Sonderforschungsbereichs 607 „Wachstum und Parasitenabwehr“. Daher soll im Folgenden die Problemstellung, mit der sich dieser Forschungsverbund befasst, kurz umrissen sowie die Einbindung des vorliegenden Projektes erläutert werden (SFB 607, 2001). Weiterführende Angaben zu diesem Thema finden sich auf den Internetseiten des Forschungsverbundes (siehe [1]).

Der SFB 607 befasst sich interdisziplinär mit den anthropogen geprägten und oftmals züchterischer Selektion unterworfenen Nutzpflanzen der Forst- und Landwirtschaft. Im Forstbereich sind dabei die Baumarten Buche und Fichte als verbreitungsmäßig und auch ökonomisch bedeutsamste Bestandteile des Wirtschaftswaldes von besonderem Interesse. In ihrem jeweiligen Ökosystem konkurrieren diese Nutzpflanzen, genauso wie auch Wildpflanzen, in Spross- und Wurzelraum um die verfügbaren standörtlichen Ressourcen. Diese Interaktionen finden sowohl auf intraspezifischer als auch auf interspezifischer Ebene statt.

Wie der Titel des Sonderforschungsbereiches schon aussagt, liegt ein besonderer Schwerpunkt bei der Betrachtung von Wirt-/Parasiten-Interaktionen. Bei Befall durch pflanzliche oder tierische Parasiten muss die Pflanze die interne Ressourcen-Verteilung zwischen individuellen Wachstumsprozessen sowie effizientem Konkurrenzverhalten gegenüber Nachbarindividuen auf der einen Seite und der Parasitenabwehr auf der anderen Seite ausbalancieren. Somit findet gerade in durch Parasitenbefall induzierten Stresssituationen zusätzlich ein Wettbewerb um den internen Ressourcenpool statt: Sollen die Ressourcen mehr in das Wachstum des Individuums investiert werden oder in Maßnahmen zur Parasitenabwehr? Die zentrale Zielsetzung des Sonderforschungsbereiches ist es daher, zu prüfen, inwieweit die Ressourcenallokation zum Zwecke der Parasitenabwehr mit dem Wachstums- und Konkurrenzverhalten der Pflanze interagiert.

Zu diesem Zweck ist die Klärung der Kosten-/Nutzen-Verhältnisse (Effizienzen) von Umsteuerungen der Ressourcen-Verteilung innerhalb und zwischen Nutzpflanzen bei unterschiedlichen abioti-

schen und biotischen Einflüssen erforderlich. Um die erzielten Ergebnisse für ein breites Spektrum an forstlichen und landwirtschaftlichen Ökosystemen gültig zu halten, erstrecken sich die Untersuchungen auf diverse pflanzliche Lebensformen, Altersstadien und Wuchsbedingungen in den Bereichen Forstwirtschaft, Obstbau, Grünlandwirtschaft und Ackerbau. Die unterschiedlichen Forschergruppen arbeiten dabei sowohl unter definierten Labor- als auch inhomogen Freilandbedingungen.

Die einzelnen Projekte des Sonderforschungsbereichs 607 sind in drei große Bereiche eingeteilt: Neben einem Zentralbereich mit den Schwerpunkten „Koordination und Modellierung“ sind dies die Komponenten mit den Forschungsschwerpunkten „Wettbewerb um Ressourcen in der Pflanze“ sowie „Wettbewerb um Ressourcen von Pflanzen im Bestand“. Das Teilprojekt B3 (Internet: [2]) ist letztgenanntem Forschungsaspekt zugeordnet. Bei der Behandlung dieses Gesichtspunktes spielt die Raumbesetzung durch die Dendromasse eine wichtige Rolle, um die Interaktionen zwischen den einzelnen Pflanzenindividuen analysieren zu können. Für verschiedene Untersuchungen werden deswegen unter anderem auch Verfahren zur zerstörungsfreien Analyse und Bestimmung der Raumbesetzung durch die Baumpflanzen benötigt.

Zur Analyse derartiger inter- und intraspezifischer Zusammenhänge sind im Rahmen des Sonderforschungsbereiches Untersuchungen an einer großen Anzahl von jüngeren Versuchspflanzen von Bedeutung. Dabei handelt es nicht nur um eine biochemische Charakterisierung der Pflanzen, sondern auch um die Erfassung der räumlichen Strukturen von ober- und gegebenenfalls auch unterirdischen Pflanzenteilen. Allometrische Erhebungen an den Versuchspflanzen sollen dazu dienen, die unterschiedlichen Raumbesetzungsstrategien, als Ausdruck von Vitalität und Konkurrenzkraft, offen zu legen. Destruktive Analysen zur Gewinnung dieser Grundinformationen scheiden dabei von vorneherein aus, die räumlichen Strukturen sollten möglichst ungestört erfasst werden, um auch ihre weitere Entwicklung verfolgen zu können. Ziel des Teilprojektes B3 war es deswegen, die methodischen Grundlagen für ein Verfahren zu schaffen, um den phänologischen und allometrischen Zustand der Pflanzen zu dokumentieren, ohne diese zugleich quantitativ oder qualitativ wesentlich zu beeinträchtigen.

3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Aus den vorangehenden Bemerkungen ergibt sich die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit: Unter Berücksichtigung bereits existierender Ansätze zur räumlichen Erfassung sollen gängige 3D-Messverfahren evaluiert und so weiterentwickelt werden, dass damit Kenngrößen von forstlichen Nutzpflanzen (insbesondere Buchen- und Fichtenpflanzen) ermittelt werden können. Parameter wie Anzahl und Position von Knospen und Verzweigungen, Verzweigungswinkel, Kronenprojektionsfläche und Kronenstruktur, bis hin zur räumlichen Verteilung der Biomasse sollen mit dem zu entwickelnden Verfahren zerstörungsfrei und möglichst automatisierbar bestimmt werden können. Diese Problemstellung verlangt einen vorwiegend methodischen Forschungsansatz, da nicht die Anwendung eines existierenden Standardverfahrens, sondern die Neuentwicklung einer speziellen Methodik im Mittelpunkt steht. Dabei sollen insbesondere auch finanzielle Aspekte berücksichtigt werden.

In vielerlei Hinsicht stellt das zu bearbeitende Themengebiet noch wissenschaftliches Neuland dar. Es existieren bislang kaum Ansätze, die im Bereich der räumlichen Datenerfassung ansonsten durchaus vorhandenen und ausgereiften Technologien auch zum Zwecke der automatisierten 3D-

Vermessung von Bäumen und Pflanzen zu adaptieren und einzusetzen. Die wenigen bereits durchgeführten Untersuchungen zur räumlichen Erfassung der Kenndaten auch von Pflanzen beschränken sich auf das Erfassen einzelner Parameter an ausgewählten Pflanzen unter optimierten Rahmenbedingungen. Als standardisierte Methode für größere Messkampagnen sind diese ersten Ansätze nicht geeignet.

Der erste Hauptteil dieser Arbeit soll einen Überblick über den zum Zeitpunkt der Abfassung dieser Arbeit aktuellen Sachstand bezüglich der 3D-Vermessung geben. Eine Zusammenstellung und Evaluierung derartiger Verfahren im Hinblick auf die Vermessung von Pflanzen liegt bislang noch nicht vor. Deswegen wird in **Kapitel II**, im Wesentlichen in Form einer Literatur- beziehungsweise Marktstudie, das Spektrum potentiell für diesen Zweck geeigneter Erfassungsmethoden aufgezeigt. Ziel ist die Evaluierung von in den verschiedensten Anwendungsbereichen zur Verfügung stehenden Verfahren zur räumlichen Vermessung im Hinblick auf ihre Tauglichkeit zur Pflanzenvermessung. Weiterhin wird an dieser Stelle eine Darstellung bereits existierender Studien zu dieser Thematik gegeben: Eine komplette Strukturanalyse, welche auch die dritte Dimension zumindest ansatzweise in Betracht zieht, findet sich bislang vorwiegend in Projekten, welche die Schaffung einer soliden Datengrundlage für die Entwicklung von Verfahren zur Pflanzenmodellierung zum Ziel haben. Auf derartige Projekte wird deswegen in diesem Kapitel der Arbeit detailliert eingegangen.

Basierend auf der in Kapitel II dargelegten Evaluierung wird anschließend in **Kapitel III** die Entwicklung zweier kostengünstiger photogrammmetrischer Verfahren für den praktischen Einsatz in der Pflanzenvermessung vorgestellt. Dabei handelt es sich zum einen um den Volumenschnitt, zum anderen um eine auf der Mehrbildtriangulation basierende Methode. Zunächst werden jeweils die methodischen Grundlagen erläutert und der Einsatz im konkreten Anwendungsbereich, insbesondere unter Berücksichtigung der jeweils notwendigen Adaptionen, dargestellt. Weiterhin wird ein Verfahren zur Weiterverarbeitung und Analyse der dreidimensionalen Messdaten vorgestellt. Die reinen räumlichen Rohdaten der Baumpflanzen an sich bringen dem Forscher noch keinen wesentlichen Nutzen. Interessant für zukünftige Anwendungen sind vor allem die Auswertemöglichkeiten, welche sich dadurch erschließen. Dazu müssen geeignete Datenstrukturen und die zugehörigen Auswertealgorithmen entwickelt werden. Ergebnis dieses Kapitels ist daher eine Methodik nicht nur zur reinen Erfassung, sondern auch zur Weiterverarbeitung und automatisierbaren Analyse räumlicher Pflanzendaten.

Abschließend wird in **Kapitel IV** ein Überblick über die Möglichkeiten und Grenzen aller vorgestellten Messmethoden gegeben. Dazu werden, aufbauend auf den methodischen Ausführungen der vorhergehenden Kapitel, die betrachteten Verfahren noch einmal insbesondere unter dem Gesichtspunkt der konkreten praktischen Anwendung im Vergleich beurteilt. Dabei wird auch das Entwicklungspotential einzelner Verfahren berücksichtigt. Dies ist insbesondere aufgrund der teilweise raschen Fortschritte auf dem Gebiet der in Frage kommenden Gerätschaften notwendig. Es empfiehlt sich deswegen in vielen Fällen, die zukünftigen Entwicklungen für weitere Untersuchungen im Auge zu behalten.

II Evaluierung existierender Messverfahren zur räumlichen Datenerfassung

1 Methodische Grundlagen der Evaluierung

1.1 Besonderheiten der räumlichen Erfassung von Pflanzen

Dreidimensionale Vermessungen werden gegenwärtig in den meisten Fällen an „künstlichen", das heißt von Menschen geschaffenen Objekten vorgenommen. Diese haben klar definierte und leicht erkennbare Ecken und Kanten und bieten somit zahlreiche Ansatzpunkte für eine unkomplizierte Erfassung: Sowohl Verfahren, welche eine händische Kennzeichnung der Objektabmessungen erfordern, als auch insbesondere die automatisierte Erkennung der Form mittels Bilderkennungsalgorithmen, können bei Körpern mit derart charakteristischer Formgebung relativ problemlos angewandt werden. Je einfacher und geometrischer die Form eines Objektes ist, desto geringer ist zudem auch der Aufwand nicht nur für die Erfassung, sondern auch für die Abspeicherung der Objektdaten. Die Vermessung künstlicher Körper erfolgt außerdem in vielen Fällen stationär. Auf portable Messgeräte kann somit zugunsten von hochwertigeren, ortsfesten Geräten verzichtet werden. Da darüber hinaus die automatisierte Vermessung räumlicher Objekte in vielen Industriebranchen ein unentbehrlicher Bestandteil moderner Fertigungsprozesse ist, sind die hier vorhandenen Messmethoden entsprechend vielseitig und ausgereift.

Im Gegensatz dazu stellen komplexe organische Objekte wie Bäume, selbst als junge Pflanzen, eine besondere Herausforderung für das zu verwendende Aufnahmeverfahren dar. Die zahlreichen Überschneidungen und Verdeckungen machen eine völlig exakte Erfassung oftmals sehr aufwändig bis unmöglich. Die in der Praxis anwendbaren Verfahren beruhen zudem, wie noch darzustellen sein wird, in vielen Fällen auf optischen Techniken. Es liegt hier in der Natur der Sache, dass dabei auch nur die optisch einsehbaren Bestandteile einer Pflanze vermessen werden können, was einen schwerwiegenden methodischen Nachteil für die Anwendbarkeit im Forstbereich bedeutet. Schwierigkeiten bereiten auch konvexe und insbesondere konkave Formen, wie sie vor allem an Blättern - aber nicht nur dort - auftreten.

Zudem fällt bei einer genauen und vollständigen Erfassung des Untersuchungsobjektes „Baum", insbesondere was Volumen- und Oberflächendaten betrifft, aufgrund dessen Unregelmäßigkeiten eine enorme Menge an Daten an. Selbst mit der Rechenleistung aktueller Computer ist die Menge an für die Darstellung nötigen Polygonen dann nur noch schwer zu bearbeiten. Im Falle einer reinen Visualisierung von dreidimensionalen Gegenständen werden in derartigen Fällen zwar Hilfsverfahren wie zum Beispiel Polygonreduktionsverfahren und progressive Polygonnetze (CAMPAGNA und KOBBELT, 1998) verwendet, was jedoch bei den Genauigkeitsansprüchen einer wissenschaftlichen Vermessung zusätzliche Unschärfen verursachen würde.

Weitere Probleme betreffen die Portabilität der Messmaschinerie: Während für die Vermessung von Gewächshauspflanzen eine stationäre Messlösung noch akzeptabel ist, setzt ein sinnvoller Einsatz im Forstbereich zwangsläufig eine robuste und flexible, vor allem aber tragbare Lösung voraus. Viele 3D-Messapparaturen sind jedoch stationär beziehungsweise erfordern, dass das zu vermessende Objekt tragbar ist. Zudem können oft nur Objekte von sehr begrenzter Größe erfasst werden. Bei

Freilandmessungen kommen zudem die inhomogenen Umweltbedingungen als erschwerendes Element hinzu. Die Präzision mancher Verfahren (zum Beispiel bei der in Abschnitt II.2.2.3 beschriebenen Messungen mit Schallfeldern) hängt unter anderem von den atmosphärischen Bedingungen ab, optische Verfahren hingegen scheitern eher am inhomogenen Hintergrund, der eine genaue Abgrenzung des Messobjektes kompliziert macht.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass eine Vermessung von Baumpflanzen deutlich andere, meist höhere Anforderungen an das einzusetzende Verfahren stellt als konventionelle Messaufgaben. Im Wesentlichen können dabei folgende Problempunkte formuliert werden, welche bei der Wahl eines zur Pflanzenvermessung geeigneten Verfahrens aus der breiten Palette der verfügbaren Methoden beachtet werden müssen:

- Unregelmäßige, oft konkave und konvexe Begrenzungen der natürlichen Objektform, keine einfachen, geometrischen Formen, wie dies für künstliche Gegenstände charakteristisch ist;
- Zahlreiche Überschneidungen und Überdeckungen, viele schwer einsehbare Objektbestandteile;
- Im Falle einer präzisen Erfassung aller Objektdetails enorm hohes Datenaufkommen bei jedem einzelnen Schritt des Messverfahrens;
- Aufnahmesystem sollte nicht nur unter Laborbedingungen, sondern auch vor Ort, also unter Freilandbedingungen, verwendbar sein;

Ziel dieses Kapitels soll es nun sein, unter Berücksichtigung der oben angeführten Punkte sozusagen eine Art „Lastenheft“ zu erstellen, anhand dessen die für eine derartige Vermessung in Frage kommenden Verfahren evaluiert werden können. Dazu werden im Folgenden, nach einem kurzen Überblick über die Branchen, in denen räumliche Vermessungsaufgaben routinemäßig durchgeführt werden, wichtige Verfahren der 3D-Messtechnik vorgestellt.

Die noch relativ seltenen Fälle, bei denen bereits moderne Methoden zur dreidimensionalen Vermessung von Pflanzen herangezogen wurden, sind dabei, in Anbetracht der oben aufgeführten Problempunkte bei dieser speziellen Messaufgabe, natürlich von besonderem Interesse. Triebfeder dieser Untersuchungen ist es in den meisten Fällen, grundlegendes reales Datenmaterial für die Validierung unterschiedlicher Simulationsmodelle (vergleiche dazu die entsprechenden Beiträge bei INRA, 1998, oder in der Ausgabe 31(3) von SILVA FENNICA, 1997) zu gewinnen: Soll die Entwicklung einer Pflanze simuliert werden, muss das zugrunde liegende Modell zunächst mit ausreichenden Eingangsdaten versorgt werden. Auf die Erfahrungen derartiger Projekte kann deswegen bei der Beurteilung der unterschiedlichen Messverfahren zurückgegriffen werden.

1.2 Strukturierung des zu erfassenden Datenmaterials

Die Notwendigkeit einer Strukturierung und geeigneten Untergliederung der zu erfassenden räumlichen Daten ergibt sich aus der grundsätzlichen Komplexität derartiger Messaufgaben. Es gibt eine Vielfalt von quantitativ und qualitativ unterschiedlichem Datenmaterial zu erheben, und dementsprechend verschieden sind auch die Möglichkeiten und Grenzen der zu diesem Zweck prinzipiell einsetzbaren Methoden. Art und Umfang des erwünschten Datenmaterials müssen daher als erstes Kriterium für die Wahl eines für die konkrete Problemstellung geeigneten Erhebungsverfahrens dienen. Im Folgenden wird deswegen eine entsprechende Strukturierung der in der vorliegenden Studie zu erfassenden Parameter vorgenommen. So kann, je nach den Anforderungen an die Messdaten, das jeweils geeignete technische Verfahren zugeordnet werden.

Grundsätzlich wird in der Vermessung zwischen dem *Nahbereich* („close range“) und der eigentlichen *Fernerkundung* („remote sensing“) unterschieden. Der Unterschied ist dabei in der Größe des zu erfassenden Objektes begründet: Nach KRAUS (1997) beinhaltet der Nahbereich die Vermessung von einzelnen Objekten (von Karosserieteilen bis hin zu Gebäuden und Industrieanlagen, das bedeutet Aufnahmeentfernungen bis zu etwa 100 Meter), die Fernerkundung hingegen befasst sich mit weiträumigeren Vermessungsprojekten, meist im Rahmen der Landesvermessung und verwandter Aufgabenstellungen. Die im Rahmen dieser Arbeit zu behandelnden Einsatzbereiche bei der Vermessung von Einzelbäumen sind somit alle der Nahbereichsvermessung zuzuordnen. Auf für die Fernerkundung spezifische Aspekte wird deswegen im Folgenden nur eingegangen, sofern sie auch auf die vorliegende Problematik übertragbar sind.

1.2.1 Einteilung nach messtechnischen Kriterien

Für eine Arbeit, welche sich mit der Methodik der räumlichen Datenerfassung befasst, ist eine Aufgliederung des zu erfassenden Datenmaterials nach für die Messtechnik relevanten Kriterien sinnvoll. Unter Berücksichtigung dieses Gesichtspunktes wird in der vorliegenden Studie eine Aufteilung der Messdaten in zwei hauptsächliche Datengruppen vorgenommen, zum einen die reinen *Strukturdaten*, zum anderen die *Körperdaten.* Tabelle 1 gibt einen Überblick über die relevanten Begriffsbestimmungen. Die Komplexität der Messaufgabe steigt dabei von links nach rechts an, wobei das jeweils aufwändigere Verfahren in der Regel auch als Übermenge das Datenaufkommen der einfacheren Verfahren mit einschließt. So bauen die Strukturdaten auf den Punktdaten auf, die Flächendaten wiederum auf den Strukturdaten und so weiter.

Tabelle 1: Gliederung von bei der Pflanzenmessung zu erhebenden räumlichen Messdaten nach messtechnischen Kriterien.

Datentyp	***Strukturdaten***		***Körperdaten***		
Untergliederung	Punktdaten	Architekturdaten	Flächendaten	Volumendaten	Biomassedaten
Erfasste Bildelemente	• Einzelpunkte	• Einzelpunkte • Verbindende Elemente zwischen Einzelpunkten (Linien, Splines etc.)	• Einzelpunkte • Flächen zwischen Einzelpunkten • Farbtexturen	• Einzelpunkte • Flächen zwischen Einzelpunkten • Farbtexturen • Von Einzelpunkten begrenzte Volumenkörper	• Nicht direkt zerstörungsfrei messbar • Statistisch aus anderen Messwerten herzuleiten

a) Strukturdaten

Viele Messaufgaben lassen sich bereits durch eine reine Erfassung der räumlichen Koordinaten von Einzelpunkten lösen, beziehungsweise bauen darauf auf. Derartiges Datenmaterial wird im Rahmen der vorliegenden Studie unter dem Begriff Strukturdaten zusammengefasst:

- *Punktdaten:* Hierbei handelt es sich um die bloße Erfassung einzelner Punkte im Raum. Im Rahmen der Aufgabenstellung des Projektes B3 zählen dazu zum Beispiel Angaben bezüglich Anzahl und räumlicher Position von Trieb- und Wurzelspitzen, Knospen und anderer Pflanzenbestandteile. In der Regel lassen sich derartige Daten mit dem geringsten Aufwand erfassen.

- *Architekturdaten:* Basierend auf diesen Punktdaten kann bereits eine Vielzahl weiterer Daten zur Architektur der Baumpflanze gewonnen werden: Trieb- und Wurzellängen sind vom messtechnischen Standpunkt aus betrachtet nur als Vektoren beziehungsweise andere verbindende Elemente zwischen den Einzelpunkten anzusehen. Durch mehr oder weniger einfache geometrische Verfahren sind daher Winkel- und Entfernungsmessungen realisierbar, sobald die räumlichen Koordinaten der Endpunkte bekannt sind. Auf diese Weise können, ausgehend von Punktdaten, weitergehende Aussagen zur Architektur gemacht werden, wie zum Beispiel Verzweigungswinkel und –typen.

b) Körperdaten

Steht bei der Vermessung nicht nur die räumliche Erfassung einzelner Punkte im Mittelpunkt, sondern sollen komplexe Körper als geometrisches Ganzes vermessen werden, so ist eine andere Vorgehensweise erforderlich. Die Möglichkeit, Flächen und insbesondere Volumina durch die einzelne Erfassung der sie umfassenden Punkte zu vermessen - wie dies bei einfachen industriellen Objekten oftmals praktiziert wird - scheidet für die komplexen organischen Formen von Bäumen in den meisten Fällen aus: KRAUS (1996, S. 395ff) gibt beispielsweise einen Überblick über die Probleme, die bei einer derartigen einzelpunktweisen Oberflächenrekonstruktion auftreten. Es gibt zwar für bestimmte Anwendungsfälle Verfahren, durch unterschiedliche Messpunktdichten den Aufwand zu verringern, indem einheitlichere Objektbestandteile mit geringerer Auflösung (Punktdichte) abgetastet werden als komplexe. Dennoch ist diese eher aufwändige, punktweise Messmethode im Falle von Volumendaten nur als Behelfslösung anzusehen. Die Erfassung der *Körperdaten* erfordert in der Regel wesentlich aufwändigere Messansätze, zudem ist das zu verarbeitende Datenmaterial deutlich umfangreicher.

Umgekehrt können prinzipiell anhand von Körperdaten auch die oben aufgeführten reinen Strukturdaten gewonnen werden. Allerdings ist der für die Erfassung von komplexen Körperdaten zu betreibende Aufwand, wie bereits angesprochen, um ein Vielfaches höher als bei der bloßen Erfassung von Punktdaten. Daher ist dieser Weg zur Gewinnung von Strukturdaten nur dann sinnvoll, wenn von dem zu vermessenden Objekt ohnehin Körperdaten benötigt werden.

Zu dieser Kategorie der Körperdaten soll im Rahmen der vorliegenden Arbeit Datenmaterial, welches den folgenden Kriterien entspricht, gezählt werden:

- *Flächendaten:* Zu diesem Anforderungsprofil für eine Messaufgabe zählt die Erfassung von Objektoberflächen, also die Messung von Blatt-, Ast- und Wurzeloberflächen, sowie auch die jeweilige Orientierung und Ausrichtung dieser Objekte.

- *Farbinformationen:* Ein weiterer Schritt zusätzlich zur Messung der Oberflächenform ist die Erfassung der Oberflächenfärbung, meist in Form von Texturen[1]. So könnten, auf den forstlichen Anwendungsfall bezogen, Informationen über Schädigungen und Nekrosen an Ästen und Blättern und deren Größe gewonnen werden.

- *Volumendaten:* Die Volumina der erfassten Pflanzen sollen möglichst getrennt nach Fraktionen (Blätter, Äste, Wurzeln, Knospen) feststellbar sein. Das Körpervolumen ist dabei als ein vollständig von Flächen umgebener Raum zu verstehen.

1 Unter „Texturen“ versteht man in der Computergrafik zweidimensionale Bilder, welche die einer bestimmten dreidimensionalen Oberfläche zugehörigen Farbinformationen enthalten und sozusagen über diese Fläche „gezogen“ („texture-mapping“) werden.

- *Biomassedaten:* Für einen Einsatz im Forstbereich ist die bloße Volumenbestimmung meist kein Selbstzweck. Die Größe, die hier vorrangig von Interesse ist, ist die Biomasse. Diese muss, um der Prämisse der zerstörungsfreien Erfassung zu genügen, durch statistische Verfahren aus den Volumendaten gewonnen werden. Eine direkte Erfassung ist mit vertretbarem Aufwand nicht möglich.

1.2.2 Einteilung nach der Verwendung der erfassten Daten

Die vorangehend beschriebene Gliederung der Messdaten ist auf die technischen Möglichkeiten der Messgeräte zugeschnitten. Für die praktische Anwendung ist allerdings eher eine andere Sichtweise interessant, nämlich eine Kategorisierung der Messaufgaben bezogen auf die spätere Verwendung der gemessenen räumlichen Daten durch den Anwender.

Hierzu schlagen GODIN et al. (1999) die folgende Methode zur Klassifizierung des Datenmaterials vor: Räumliche Messdaten von Pflanzen dienen häufig als Ausgangsmaterial für die Modellparametrisierung sowie die Evaluierung von Modellierungssoftware. Die von den genannten Forschern der INRA beschriebene Klassifizierung ist daher insbesondere auf diese Bedürfnisse ausgelegt. Unterscheidungskriterium ist demnach die Relevanz der erhobenen Messdaten zum einen für interne Verteilungsvorgänge und die Stoffallokation innerhalb der Pflanze, zum anderen für pflanzenexterne Vorgänge, wie zum Beispiel die Verhältnisse im Kronenraum. Folgende zwei Datengruppen werden gemäß dieser Aufteilung unterschieden:

- *Geometrische Informationen:* Dazu zählen räumliche Position und Orientierung, gegebenenfalls auch Form und Größe, der einzelnen Pflanzenbestandteile. Diese Faktoren bestimmen vorwiegend die Variabilität der Umweltfaktoren (Licht, Windgeschwindigkeit usw.) innerhalb des von der Pflanze besetzten Raums, also pflanzenexterne Vorgänge.

- *Topologische Informationen:* Die Topologie beschreibt das Verzweigungsmuster, also die Verbindung der einzelnen Pflanzenbestandteile miteinander. Sie ist somit der entscheidende Faktor für die pflanzeninternen Vorgänge (Wasserhaushalt, Assimilattransport und Assimilatspeicherung etc.).

Im Gegensatz zu der im vorangehenden Abschnitt vorgestellten, eher an technischen Gesichtspunkten orientierten Aufteilung in Struktur- und Volumendaten ist hier also das Unterscheidungskriterium an der biologischen Bedeutung der jeweiligen Daten orientiert. Die vorliegende Arbeit behandelt allerdings vorwiegend den methodischen Aspekt der Erfassung. Daher wird im Folgenden meist der in Absatz II.1.2.1 vorgestellten Aufgliederung des Datenmaterials der Vorzug gegeben. Aspekte von Geometrie und Topologie werden dabei jedoch mitberücksichtigt, indem nicht nur die räumlichen Daten der einzelnen Pflanzenelemente, losgelöst vom strukturellen Zusammenhang, als Messobjekte betrachtet werden, sondern auch die jeweiligen Verbindungen zu den anderen Pflanzensegmenten miterfasst werden. Wichtig ist die Hinzuziehung der topologischen Daten für die Strukturanalyse: Die diversen Erfassungsmethoden liefern in der Regel nur die reinen räumlichen Geometriedaten. Erst durch das Einbinden der Topologiedaten - welche durch die 3D-Erfassung meist nur indirekt mit erfasst werden - kann auch die Architektur analysiert werden.

1.3 Kriterien für die Evaluierung von Messverfahren

In Abschnitt II.1.1 wurden bereits die wesentlichen Problempunkte, in denen sich die 3D-Vermessung von Pflanzen von der üblichen räumlichen Erfassung einfacherer, meist künstlicher Objekte

unterscheidet, angesprochen. Die Fähigkeit, trotz dieser Schwierigkeiten sinnvolle Messergebnisse erzielen zu können, muss natürlich als Grundvoraussetzungen bei jedem Verfahren geprüft werden. Neben dem korrekten Handhaben des komplexen Untersuchungsobjektes „Baumpflanze“ an sich gehört dazu auch nach Möglichkeit die Fähigkeit, unter inhomogenen Freilandbedingungen erfolgreich Messungen durchführen zu können. Insbesondere ist in diesem Zusammenhang von Interesse, inwieweit die in der Regel relativ hohe Genauigkeit bei der Erfassung konventioneller Messobjekte auch bei der Pflanzenvermessung erzielt werden kann.

Eine weitere grundsätzliche Anforderung ergibt sich schon aus der Fragestellung dieses Projektes: Zerstörungsfreie Datenerfassung ist nötig, um non-destruktive Messungen, auch über einen längeren Zeitraum hinweg (so zum Beispiel für Zuwachsgrößen), durchführen zu können. Daher kommen beispielsweise ein Großteil der üblicherweise gebräuchlichen, aber eben destruktiven Methoden zur Biomassebestimmung von vorneherein nicht in Betracht.

Neben den bislang aufgeführten, grundlegenden Beurteilungskriterien für die Tauglichkeit eines Verfahrens gibt es noch andere Punkte, die von Interesse sind: So darf bei einer Evaluierung der unterschiedlichen Methoden selbstverständlich der finanzielle Aspekt nicht außer Acht gelassen werden. Je nach Messverfahren sind gegebenenfalls höhere Investitionen, sei es in das Messgerät an sich oder in das weiterverarbeitende Computersystem, nötig. Der Anschaffungspreis und natürlich auch die Betriebskosten sind jedoch stets in Relation zu der erreichbaren Arbeitserleichterung für den vorgesehenen Einsatzzweck und der Verbesserung der Datenqualität zu setzen. Im Optimalfall reicht für das jeweilige Verfahren der Einsatz handelsüblicher und preiswerter Hard- und Software, gegebenenfalls mit entsprechenden Modifikationen, aus.

Zudem dürfen die Methoden dabei nicht nur vom Standpunkt ihrer bloßen technischen Möglichkeiten aus betrachtet werden. Unter praktischen Gesichtspunkten ist hier der Faktor der konkreten Verfügbarkeit einsatzfähiger Messlösungen zu nennen, die bloße prinzipielle Eignung einer Methodik hilft oftmals nicht weiter. Die vollständige Neuentwicklung derartiger Verfahren geht weit über den Horizont dieser Arbeit hinaus.

Anhand der vorangehend aufgeführten Punkte können nun die unterschiedlichen Anforderungen an das zu entwickelnde Messverfahren formuliert und in einem entsprechenden „Lastenheft“ festgehalten werden. Im Folgenden werden die Kriterien genannt, anhand derer die verfügbaren Messverfahren auf ihre Eignung für die Pflanzenvermessung hin getestet werden sollen.

Eignung zur Erfassung des komplexen Messobjektes

- Tauglichkeit zur Erfassung verdeckter und sich überschneidender Objektbestandteile einer komplexen organischen Struktur;

- Datenerfassung erfolgt zerstörungsfrei und möglichst auch kontaktlos;

Eignung für das spezielle Messumfeld bei der Pflanzenvermessung

- Mobilität der Messapparatur beziehungsweise Eignung für die Vermessung nicht-beweglicher Objekte;

- Eignung für die Erfassung von Daten unter nicht-homogenen Umweltbedingungen im Freiland;

Eignung des gewonnenen Datenmaterials

- Qualitative Aspekte: Ausreichende Genauigkeit für die angestrebten Einsatzgebiete;
- Quantitative Aspekte: Umfang und Art der gemessenen Daten gemäß der in Kapitel II.1.2.1 vorgenommenen Einteilung in Struktur- und Körperdaten;

Sonstige Beurteilungskriterien

- Finanzieller Aufwand sowohl für die Anschaffung der Messgeräte als auch für die laufenden Kosten bei der Durchführung der Messungen;
- Verfügbarkeit praxiserprobter Messsysteme, nicht nur für konventionelle Messungen, sondern insbesondere auch für die Pflanzenvermessung;
- Zeitaufwand für die einzelnen Messsessions;
- Optional: Zusätzlicher Informationsgewinn durch den Einsatz des Verfahrens im Vergleich zur konventionellen händischen Messung;

1.4 Anwendungsgebiete automatisierter 3D-Messmethoden

Der Einsatz automatisierter dreidimensionaler Messmethoden ist, wie bereits dargelegt, im forstlichen Bereich gegenwärtig eher unüblich. Zahlreiche andere Branchen, insbesondere im industriellen Sektor, machen hingegen regen Gebrauch von derartigen Verfahren. Deswegen existieren dort auch schon ausgereifte Methoden sowie eine intensive Forschung und Weiterentwicklung in diesem Bereich. Es liegt daher nahe, zur Lösung der im Rahmen dieses Projektes gegebenen Problematik einen Blick auf diese bereits vorhandenen Messmethoden zu werfen und sie auf ihre Anwendbarkeit für die gegebene Aufgabenstellung hin zu untersuchen. Im Folgenden sollen deswegen zunächst in Kürze einige Anwendungsbereiche genannt werden, in denen gegenwärtig routinemäßig dreidimensionale Messmethoden angewandt werden.

- *Vermessung im industriellen Bereich*

Einer der häufigsten Anwendungsbereiche für dreidimensionale Messtechnik im Nahbereich ist dieser Sektor. Deswegen ist die entsprechende Forschung in diesen, meist sehr finanzkräftigen Branchen auch am weitesten fortgeschritten. Im Rahmen des „Reverse Engineering“ und „Rapid Prototyping“ wird dabei räumliche Vermessung hauptsächlich im Bereich der Qualitätssicherung und der Entwicklung angewandt. Mittels CAD-Systemen[2] werden die zu fertigenden Teile konstruiert, die Fertigungsanlagen werden im Optimalfall ebenfalls direkt anhand dieser Entwürfe angesteuert (CAM[3]). Die fertigen Produkte können dann gleich wieder dreidimensional erfasst und mit den Entwurfsdaten aus dem CAD-Programm auf Abweichungen hin verglichen werden. Moderne Verfahren der Bildanalyse erlauben hier gleichzeitig eine Erfassung von Oberflächenstruktur und Materialqualität, siehe dazu die auf entsprechenden Workshops publizierten Beiträge, zum Beispiel bei ABW (1999) oder AICON (1999). Für diese Bereiche (zum Beispiel Automobilbranche und Feinmechanik) sind inzwischen ausgereifte Speziallösungen zur Vermessung - oftmals basierend auf optischen Verfahren - und Visualisierung (Stichworte: Holobench, Cave) räumlicher Strukturen erhältlich. Bei

2 CAD: Computer Aided Design.
3 CAM: Computer Aided Manufacturing.

der im Industriebereich heutzutage üblichen Fließbandfertigung lassen sich 3D-Messgeräte zudem leicht in den automatisierten Fertigungsprozess unter definierten Bedingungen integrieren.

- *Architektur- und Anlagenvermessung*

Unter diesem Bereich soll die Vermessung von Bauwerken und Gebäuden aller Art zusammengefasst werden. Dazu zählen neben dem Architektur- und Bauingenieurswesen (Gebäude, Fabriken, Innenräume, Bauschäden etc.) auch die Vermessung von archäologischen Objekten (MAUELSHAGEN, 1989), sowie Projekte im Rahmen der Denkmalpflege. Mittel der Wahl für diesen Einsatzbereich sind meist photogrammmetrische Methoden. Zahlreiche Beispiele hierzu lassen sich unter anderem bei KRAUS (1996) nachlesen.

- *Landesvermessung und GIS*

In diesen Anwendungsbereichen hat die dreidimensionale Datenerfassung sich inzwischen ebenfalls einen festen Platz erobert und wird hier auch im forstlichen Bereich angewandt, so zum Beispiel bei der Gewinnung des grundlegenden Datenmaterials aus Luft- und Satellitenbildern für digitale Geländemodelle und ähnliche Anwendungen. Verbreitete 3D-CAD-Softwarepakete (z.B. *Bentley Microstation* oder *AutoCAD*) sind für diesen Einsatzbereich bereits so angepasst beziehungsweise modular erweiterbar, dass sie die dreidimensionalen Landschaftsdaten direkt von den Erfassungsgeräten (meistens sogenannte Stereoplotter) übernehmen, verarbeiten und visualisieren können.

Viele der hierfür angewandten Konzepte der Fernerkundung sind allerdings nicht ohne Einschränkungen auf die Vermessung von Objekten im Nahbereich übertragbar (als Ausnahme sei hier allerdings insbesondere die Stereophotogrammmetrie angeführt).

- *Medizinische Anwendungen, „Biophotogrammmetrie“*

Im medizinischen Bereich ist die Erfassung von dreidimensionalen Daten für diverse Einsatzgebiete bekanntermaßen ein wichtiges Diagnoseinstrument (Röntgen, Kernspintomographie, Rasterstereoskopie). Auch hierzu finden sich entsprechende Beiträge bei ABW (1999). Am Rande erwähnt sei hier, dass erstaunliche viele Lösungen dabei gerade im Bereich der Schönheitschirurgie existieren (Erfassen des „Jetzt“-Zustandes, um die Veränderungen darstellen zu können). Daneben existieren auch Projekte zur Vermessung des menschlichen Körpers ohne medizinische Zielsetzungen: Für Ergonomiestudien am Arbeitsplatz oder einfach auch für Einsatzgebiete wie Maßkleideranfertigung werden inzwischen ebenfalls automatisierte dreidimensionale Messmethoden angewandt.

Allen diesen Lösungen ist gemeinsam, dass sie eher für den stationären Einsatz gedacht und zudem, insbesondere wenn sie aus dem medizinischen Sektor stammen, meist im oberen Preisbereich angesiedelt sind. Für den Einsatz im forstlichen Bereich sind sie daher in der Regel weniger geeignet.

- *Einsatz in der Unterhaltungsbranche*

Gerade dieser Bereich hat in den letzten Jahren einen ungeheuren Aufschwung erlebt. Ein wichtiger Bestandteil dieses Schlagwortes ist die werbewirksame Dreidimensionalität. In diesem Bereich ist die Unterhaltungsindustrie (Filmbranche, Computerspiele, WWW-Design, zum Beispiel für Online-Shops) die treibende Kraft hinter der Entwicklung von räumlichen Datenerfassungsmethoden (unter

anderem „Motion Capturing" für realistische Formen und Bewegungsabläufe in computeranimierten Filmen und Spielen). Deswegen wird hier oftmals weniger Wert auf messtechnisch akkurate Werte, sondern eher auf einfache Bedienbarkeit und Natürlichkeit gelegt. Für den Einsatz bei wissenschaftlichen Vermessungsaufgaben sind deswegen für diesen Bereich vorgesehene Lösungen erst sorgfältig auf ihre Verwendbarkeit hin zu untersuchen.

- *Kriminalistik*

Insbesondere photogrammmetrische Messmethoden zur Beweissicherung und zur Rekonstruktion von bestimmten Situationen, speziell bei Verkehrsunfällen, kommen im forensischen Bereich häufig zur Anwendung. Dabei ist es von Vorteil, dass es möglich ist, auch anhand von Amateuraufnahmen aus unbekannten Positionen räumliche Messungen in ausreichender Genauigkeit vorzunehmen (Prinzip der „inverse camera", siehe dazu auch Abschnitt II.2.2.6.1). Die Photogrammmetrie ist daher schon lange ein bewährtes Hilfsmittel in der Kriminalistik.

2 Methoden der dreidimensionalen Datenerfassung

2.1 Räumliche Messverfahren im Überblick

Je nach zu vermessendem Objekt und quantitativen und qualitativen Ansprüchen an das zu erhebenden Datenmaterial stehen die unterschiedlichsten Messtechniken zur Verfügung. Tabelle 2 versucht, ohne Anspruch auf Vollständigkeit, einen Überblick über die gängigen Kategorien nicht-destruktiver Messverfahren zu bieten, die zum Erhalt räumlicher Informationen in einem für die angestrebte Zielsetzung ausreichenden Umfang dienen können.

Tabelle 2: Übersicht über verschiedene gängige non-destruktive Messmethoden zur Erhebung räumlicher Objektdaten.

kontaktlos (*non-contact*)										**nicht-kontaktlos** (*direct contact*)		
Tomographie und verwandte Verfahren			Optische Verfahren									
			Aktive optische Verfahren			Passive optische Verfahren (Photogrammmetrie)						
CT	(N)MR MRI	SPECT PET	Laser	Weißlicht	Strukturiertes Licht	Einzelbildauswertung	Stereophotogrammmetrie	Mehrbildtriangulation	Volumen- bzw. Silhouettenschnitt	händische Vermessung	Vermessung mit Magnetfeld	Vermessung mit Schall

In den folgenden Abschnitten werden die wesentlichen Methoden im Detail erläutert. Es muss darauf hingewiesen werden, dass die bei der Beschreibung der einzelnen Verfahren teilweise beispielhaft angegebenen Gerätschaften, sowie natürlich auch deren technische Daten und Preisangaben, selbstverständlich nur den Stand der Entwicklung zum Zeitpunkt der Abfassung dieser Arbeit wiederspiegeln können. Sie können daher nur als allgemeiner Anhalt dienen, um das jeweilige Verfahren richtig einschätzen zu können. Preise und technische Fähigkeiten unterliegen gerade in diesem Sektor einem ständigen Wandel.

2.2 Detailinformationen zu den einzelnen Messverfahren

2.2.1 Manuelle Vermessung

Verfahrensgrundlagen

Natürlich können Objekte auch konventionell „per Hand“, mittels Maßband, Winkelmessgerät, Schiebelehre und ähnlicher Ausrüstung, in gewissem Umfang räumlich erfasst werden. Da dies für die meisten praktischen Einsatzfelder einer dreidimensionalen Vermessung, selbst bei der bloßen Erfassung von Punktdaten, zu zeitaufwendig und dabei meist auch zu ungenau ist, soll an dieser Stelle auf diese ohnehin wahrscheinlich ausreichend bekannten Messtechniken nicht weiter eingegangen werden. Zum Zwecke von Kontroll- und Vergleichsmessungen muss jedoch größtenteils auf derartige Methoden als Referenzverfahren zurückgegriffen werden, wie zum Beispiel bei der Längenmessung an Astsegmenten sowie der Messung von Verzweigungswinkeln.

Ein im Rahmen dieses Überblicks über verfügbare Messverfahren dennoch am Rande erwähnenswerte mechanische Methode besteht darin, die Konturen des zu vermessenden Objektes mit einem mittels Gelenken beweglich befestigten Taster abzufahren. Die Gelenke enthalten Sensoren, welche die Bewegungen des Tasters registrieren und aus den daraus resultierenden Änderungen das Anstellwinkels dreidimensionale Koordinaten generieren. Es kommt somit ein lokales Koordinatensystem mit Ursprung im Fuß das Messgerätes zum Einsatz. Erfasst werden können auf diese Weise nicht nur Einzelpunkte, sondern auch Linien, Polygone sowie komplexere Kurvenformen, allerdings prinzipbedingt nicht kontaktlos.

Ein Beispiel für ein derartiges Produkt ist der *Microscribe3D* (Hersteller *Immersion Corporation*, siehe Internet-URL [13]). Dieses Gerät ermöglicht es beispielsweise, gut zugängliche Objekte in einem kugelförmigen Raum (ausgehend vom Basalgelenk) von je nach Ausführung etwa 130 bis 170 cm Durchmesser manuell zu erfassen. Die Messgenauigkeit liegt nach Herstellerangaben zwischen 0,23 und 0,43 mm, die resultierenden 3D-Objekte können aus bis zu 1.000.000 Polygonen bestehen. Die Weiterverarbeitung am PC erfolgt über gängige CAD-Software. Preislich liegen die verschiedenen Modellausführungen zwischen 3.000 und 5.000 USD.

Eignung für die Pflanzenvermessung

Die manuelle Vermessung von Pflanzen zählt zu den aufwändigsten und teilweise ungenausten Verfahren zum Gewinnen von räumlichen Objektdaten (sofern nicht speziellere Verfahren wie das vorangehend beschriebene System verwendet werden). Dennoch handelt es sich um eine relativ preiswerte und in vielen Fällen, gerade bei Bäumen, auch um die bisher einzig mögliche Methode, um zumindest einfache 3D-Informationen zu erhalten. Da die händische Messung, trotz ihrer Limitationen, auch die momentan gängige Methode ist, um derartige Daten zu erhalten, dient sie als Referenzverfahren für die Bewertung anderer Verfahren.

Zwar können mit mechanischen beziehungsweise händischen Verfahren meist auch die komplexen Strukturen der Pflanzen inklusive Überdeckungen erfasst werden, die Vorgehensweise erfolgt dabei allerdings natürlich nicht kontaktlos und ist in der praktischen Anwendung eher als sehr arbeitsintensiv einzuschätzen. Erfasst werden nur Punkt- und Strukturdaten. Zudem muss der Großteil der zeitaufwendigen Messarbeiten direkt am Objekt erfolgen. Deswegen erweisen sie sich in den meisten Fällen für das komplexe Aufnahmeobjekt „Baum“ bei der anvisierten räumlichen Erfassung als nicht oder nur umständlich beziehungsweise nur für eng umgrenzte Teilgebiete einsetzbar. Bezüg-

lich des ebenfalls angesprochenen Einsatzes eines mechanischen Tasters, wie am Beispiel des *Microscribe3D* beschrieben, berichten HANAN und ROOM (1997, S. 32f) von eher schlechten Erfahrungen bei der Pflanzenvermessung.

2.2.2 Messung mit Magnetfeldern

Verfahrensbeschreibung

Nach diesem Verfahren arbeitende Messgeräte basieren auf dem Prinzip magnetischer Induktion: Durch einen speziellen Generator wird ein Magnetfeld begrenzter Größe erzeugt. Die relative Position eines entsprechend magnetempfindlichen Sensors innerhalb dieses Feldes kann dadurch ziemlich genau bestimmt werden. Als Verfahren kommt dabei die Triangulation zum Einsatz, eine Vorgehensweise, die in diversen Variationen oftmals bei der räumlichen Messung, insbesondere zur Punktbestimmung, zum Einsatz kommt. Es sei daher an dieser Stelle auf die Beschreibung dieses Messprinzips im Abschnitt über die photogrammmetrische Mehrbildauswertung (II.2.2.6.5) verwiesen.

Auf dem Markt ist momentan vor allem ein nach diesem Verfahren arbeitendes Gerät etabliert, das bereits seit 1970 verfügbare *3SPACE Fastrak* der Firma *Polhemus* (Internet-Adresse: [14]). Im Rahmen der gegebenen Aufgabenstellung ist dieses Messsystem deswegen von besonderem Interesse, weil es bereits zur räumlichen Vermessung von Bäumen eingesetzt wurde. Daher sollen die technische Daten und Besonderheiten dieses Gerätes im Folgenden für eine kurze Beschreibung der grundsätzlichen Methodik herangezogen werden.

Zentrales Element des Messsystems ist die Basisstation, welche die weiteren peripheren Komponenten ansteuert, die nötigen Berechnungen durchführt und mittels einer seriellen Schnittstelle für die Verbindung zum weiterverarbeitenden Computer sorgt. Angeschlossen an diese Basisstation ist zum einen der Transmitter, welcher mittels drei von einer charakteristischen Plastikkugel umschlossenen Magnetspulen die nötigen niederfrequenten Magnetfelder generiert. Somit bildet der Transmitter das Bezugssystem für die Vermessung und dient als lokales Koordinatensystem. Zur eigentlichen Positionsbestimmung dienen einer (oder mehrere - bis zu vier sind möglich), ebenfalls mit der Basisstation verbundene passive Receiver in verschiedenen Ausführungen. Entscheidendes Bestandteil dieser Receiver sind jeweils drei magnetempfindliche Spulen.

Nach einer entsprechenden Kalibrierung des Systems kann die Entfernung dieser drei Receiver-Spulen von jeder einzelnen der drei Magnetfeldgeneratoren anhand der durch magnetische Induktion in ihnen erzeugten Spannung ermittelt werden. Die digitalen Signalprozessoren (DSP) der Basisstation können somit durch mehrfache Triangulation - drei Spulen im Receiver und drei unterschiedliche Magnetfelder des Transmitters - nicht nur die Position des Receivers in kartesischen Koordinaten, sondern auch dessen Orientierung (Azimut, Neigung und Drehwinkel) innerhalb der Magnetfelder zu jedem beliebigen Zeitpunkt aufzeichnen. Eine direkte Sichtverbindung zwischen Receiver und Magnetfeld ist hierbei aufgrund der verwendeten niedrigen Frequenzbänder nicht nötig. Somit stellt sich für das Bedienpersonal der Receiver von der Handhabung her als „Zeiger“ dar, funktional vergleichbar mit einer Computer-Maus, lediglich im dreidimensionalen Raum: Kontinuierlich (Latenzzeit < 4 ms) oder mit jedem „Mausklick“ können Lage und Ausrichtung des Receivers erfasst und und von dem mit der Basisstation verbundenen Computer gespeichert werden. Abbildung 1 stellt diese prinzipiellen Zusammenhänge noch einmal dar.

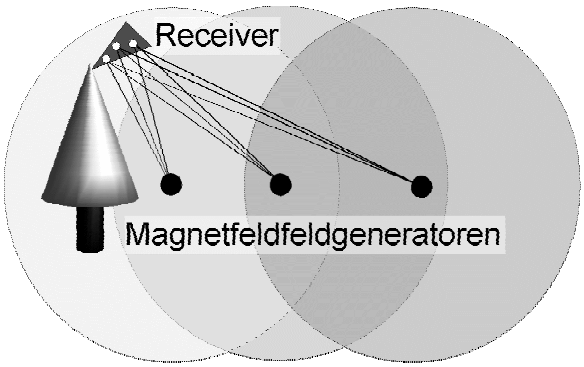

Abbildung 1: Prinzipielle Funktionsweise der Vermessung mit Magnetfeldern. Die durchgezogenen Linien stellen die gemessenen Entfernungen der Receiver von den Magnetfeldgeneratoren dar.

Problematisch ist bei dieser Methode prinzipbedingt lediglich die Erfassung metallischer Gegenstände, welche das Magnetfeld beeinflussen können. Solche sind somit vor Beginn der Messungen möglichst aus der näheren Umgebung des Messbereiches zu entfernen. Die für den Betrieb des Gesamtsystems nötige Stromversorgung kann aus normalen Autoakkumulatoren gewonnen werden, die Einsatzfähigkeit ist also auch für die mobile Verwendung gewährleistet.

Die auf diese Weise erreichbare Genauigkeit ist für zahlreiche Messzwecke mehr als ausreichend: Bei einer mittleren Abweichung von etwa 7,6 mm bei der Koordinatenmessung und 0,15° bei der Winkelmessung (Werte gemäß Herstellerangaben für den Optimalfall) ist der eigentliche limitierende Faktor das die Receiver bedienende Personal.

Ausschlaggebend für die Kosten einer derartigen Systems ist die Stärke des Magnetfeldes: Ein System mit einer Reichweite von knapp vier Metern (das heißt, ein kugelförmiger Raum mit diesem Radius um den Transmitter herum kann erfasst werden) kostet 7.700 EUR, für die Spezialausführung mit bis zu neun Metern Reichweite („long range“) ist mit zusätzlichen Kosten zu rechnen.

Aus der Verfahrensbeschreibung geht bereits hervor, dass dieses Verfahren zunächst kein Volumenmodell des erfassten Objekts zur Verfügung stellt. Vielmehr eignet es sich, da jeder Punkt einzeln aufgenommen werden muss, eher zur Vermessung der Koordinaten von Einzelpunkten. Diese sollten zudem gut zugänglich sein, da ein Großteil der aufwändigen Messtätigkeit bei dieser Methode vor Ort, direkt am Objekt, stattfinden muss.

Eignung für die Pflanzenvermessung

Von Forschern der französischen Forschungsanstalt INRA wurde die vorangehend beschriebene Methode zur räumlichen Vermessung von Punktdaten bereits erfolgreich in der Praxis zur Erfassung von Baumstrukturen eingesetzt. Hintergrund dieses Messprojektes war es vor allem, solide Datengrundlagen für verschiedene Ansätze zur Erstellung von funktional-strukturellen Baummodellen zu gewinnen (SINOQUET et al., 1997).

Die Untersuchungen wurden an einem zwanzigjährigen, gut sieben Meter hohen Walnussbaum (*Juglans regia* L.) vorgenommen (SINOQUET und RIVET, 1997). Zum Einsatz kam dabei das bereits beschriebene System *Polhemus Fastrak*. Bei der Erfassung der Architektur wurde hier auf die von GODIN und GUÉDON (1996) vorgeschlagene Codierung zurückgegriffen, bei der die Pflanze in Ach-

sen, Segmente und Wachstumseinheiten unterteilt wird. Es sei an dieser Stelle auf die Beschreibung dieser Architektursyntax in Kapitel III.3.2.2.1 verwiesen. Die für die Erfassung der 3D-Daten entwickelte Software namens *DiplAmi* ermöglicht es, zusätzlich zur Erhebung der geometrische Daten auch topologische Informationen mit einzubeziehen. Somit kann auf diese Art und Weise die komplette Architektur eines Baumes erfasst und mit dem Programm *AMAPmod* (GODIN et al. 1997) weiter verarbeitet und topologisch analysiert werden. Auch eine realitätsnahe Visualisierung der gemessenen Bäume kann erfolgen, hierzu eignet sich die frei verfügbare Ray-Tracing-Software *POVRay*.

Die praktische Erfassung beginnt dabei mit dem Stamm und begibt sich rekursiv weiter in die jeweils untergeordneten Einheiten. Zusätzlich erfolgte eine Messung des Durchmessers jeder Einheit und eine Erfassung der jeweiligen Blätter und gegebenenfalls Früchte. Der Zeitaufwand ist dabei nicht unerheblich: Das Messteam benötigte für die gesamte Erfassung zwei Monate, 20 Tage davon wurden direkt am Messobjekt zugebracht. Dabei wurden durchschnittlich 800 Punkte pro Tag erfasst. Der Walnussbaum bestand aus 4.213 Wachstumseinheiten, dazu 16.224 Blättern und 2.007 Früchten.

Als problematisch erwies sich dabei, wie bei allen nicht kontaktlosen Verfahren, vor allem der Zugang zu den zu vermessenden Wachstumseinheiten, ohne dabei deren Position zu beeinflussen. Zudem führt bereits leichter Wind aufgrund der resultierenden Baumbewegungen zu deutlichen Ungenauigkeiten. Es ist bei der Vermessung außerdem zu beachten, dass eventuell eingesetzte Gerüste und Leitern aus Metall die Messgenauigkeit einschränken. Diese Problempunkte sind, insbesondere auch in Anbetracht der langen Messdauer am Objekt, zu bedenken. Bisherige Untersuchungen zur Baumvermessung beschränkten sich im zitierten Projekt deswegen auch auf einige wenige, ausgewählte Einzelbäume.

Neben diesen Untersuchungen wurde dieses Verfahren auch zu anderen Messzwecken herangezogen: THANISAWANYANGKURA et al. (1997) verwendeten die Methodik bei Untersuchungen zur Heliotropie von Baumwollblättern. Hierzu wurde mehrmals täglich die Orientierung der Blätter mit dem Magnetfeldmessgerät erfasst und dies mit der Messung des Leaf Area Index kombiniert. Auch in weiteren Anwendungen dieser Technik steht die Erfassung der Lichtverhältnisse im Kronenraum verschiedener Pflanzen unter Berücksichtigung der Architektur im Mittelpunkt: SINOQUET et al. (1998) beschreiben allgemein den Einsatz einer Kombination aus 3D-Digitalisieren und Bildbearbeitung zu diesem Zweck. Bei PLANCHAIS und SINOQUET (1998) steht dabei insbesondere die Buche (*Fagus sylvatica* L.) im Mittelpunkt der Untersuchungen, während MABROUK und SINOQUET (1998) Weinstöcke untersuchen. Untersuchungen von DREXHAGE et al. (1999) sowie DANJON et al. (1999a+b) zeigen die Magnetfeldmessmethode bei der Analyse des Wurzelsystems. Die Vorgehensweise erfolgt dabei weitgehend analog zur Vermessung der oberirdischen Baumarchitektur, allerdings am freigelegten und gewaschenen Wurzelsystem.

2.2.3 Messungen mit Schall

Verfahrensbeschreibung

Auch Schallwellen lassen sich zur räumlichen Vermessung nutzen, man spricht von sogenannten „sonic digitizers“ (SCIENCE ACCESSORIES, 1996): Anhand der Zeit, die eine von einem Emitter ausgesendete Schallwelle zu einer Anzahl von Mikrofonen bekannter Position zurücklegt, kann die räumliche Position des Emitters relativ zum Receiver bestimmt werden (vergleiche Abbildung 2). Somit ist diese Funktionsweise im Prinzip sehr ähnlich zu der vorangehend beschriebenen Magnetfeldmessung, da sie ebenfalls auf den Prinzipien der Triangulation beruht. In diesem Fall werden die

Entfernungen nur nicht durch die Stärke der magnetischen Induktion, sondern durch die Zeit bis zum Eintreffen der Schallwellen bestimmt, ansonsten entsprechen sich die Verfahren in vielen Aspekten.

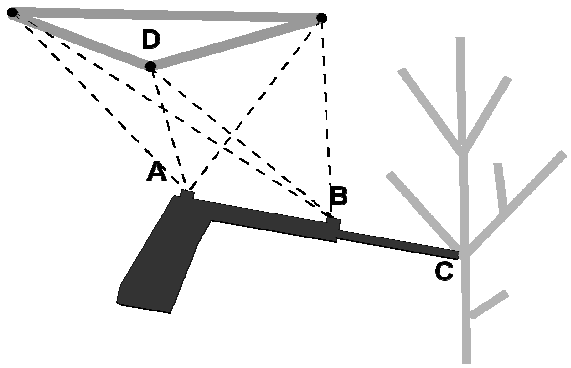

Abbildung 2: Prinzipielle Funktionsweise eines „sonic digitizer". Die durch Schallwellen gemessenen Entfernungen sind durch gestrichelte Linien gekennzeichnet.

Bei den Messungen mittels Schallfeldern fungiert ebenfalls eine Basisstation als verbindendes Element zwischen den einzelnen Bestandteilen des Messgerätes und dem Computer. Der Zeiger ist in diesem Fall ein pistolenartiger Schallemitter (A, B), welcher an die zu vermessende Koordinate (C) angelegt wird. Dieser Emitter sendet von den Punkten A und B zeitlich versetzt Schallwellen aus. Diese Schallwellen werden von einem System aus drei Mikrofonen (D) empfangen, deren relative Orientierung zueinander durch Anordnung in Dreiecksform bekannt ist. Anhand der bekannten, konstanten Geschwindigkeit der Schallausbreitung und der bekannten Distanzen $\overline{AB}$ und $\overline{BC}$ kann durch Triangulation die räumliche Lage des Punktes C berechnet werden.

Wichtig ist dabei, dass Sichtkontakt zwischen Emitter und Mikrofonen besteht, ansonsten können sich auch die Schallwellen nicht ungestört ausbreiten. Aus diesem Grund wurde der Zeiger auch derart konstruiert, dass der zweite Schallemitter (B) nicht genau auf der Messspitze (C) zu liegen kommt, sondern etwas zurückgesetzt: So bestehen bessere Voraussetzungen, um auch bei verdeckten Objektbestandteilen den Kontakt Transmitter-Mikrofondreieck herzustellen.

Zudem können bei mehreren rasch aufeinander folgenden Messungen die Echos der vorangehenden Schallwelle - insbesondere, wenn harte Resonanzflächen vorhanden sind - die laufende Messung beeinflussen. Da zum Beispiel auch Wetter und atmosphärische Bedingungen die Messgenauigkeit beeinträchtigen können, können bei derartigen Messgeräten im praktischen Einsatz relativ viele Unabwägbarkeiten das Messergebnis beeinflussen.

Anhand des Digitizers *Freepoint3D* der Firma *GTCO* (Internet-URL [15]) sollen im folgenden noch typische technische Spezifikationen sowie die nötigen Investitionen für ein derartiges System dargestellt werden. Dieses Gerät wurde ebenso wie der im vorigen Abschnitt beschriebene *Fastrak* bereits zur Vermessung von Pflanzen eingesetzt und ist deswegen von besonderem Interesse für die Aufgabenstellung des vorliegenden Projektes.

Wie auch beim *Polhemus Fastrak* hängt der Kostenaufwand für die Beschaffung vom erwünschten Erfassungsbereich ab: Das kleinste Gerät (erfasster Raum: 1 m³) kostet 7.500 USD, die Variante für 2,4 m³ 10.500 USD und das große Modell (4,8 x 2,4 x2,4 m) 13.500 USD. Die Auflösung beträgt nach Herstellerangaben unter optimalen Bedingungen 0,01 Zentimeter (zur Genauigkeit werden keine Angaben gemacht). Dieser Wert liegt in einer Größenordnung, die auch in diesem Fall nicht ins

Gewicht fallen dürfte, da das manuelle Führen des „Zeigers“ für deutlich größere Ungenauigkeiten sorgt. Schwerer wiegt die verfahrensbedingte Abhängigkeit von den Umweltbedingungen. Mit einer mobilen Stromversorgung ist dieses System als transportabel zu bezeichnen.

Auch bezüglich seiner Limitationen ähnelt dieses Verfahren der vorangehend beschriebenen Messung mittels Magnetfeldern: Die Erfassung von Einzelkoordinaten ist leicht möglich, sollen aber komplexe Körper als Ganzes vermessen werden, stößt der Anwender rasch an die Grenzen. Zudem erfolgen die zeitaufwändigen Messungen wiederum direkt am Objekt.

Eignung für die Pflanzenvermessung

Wie die Magnetfeldmessungen hat dieses Verfahren bereits eine Bewährungsprobe im Einsatz auch bei der Vermessung von Pflanzen hinter sich. Durchführendes Forschungsinstitut war hier das „Center for Plant Architecture Informatics (CPAI)“ in Australien (siehe Internet-URL [3]). Hintergrund dieser Untersuchungen war das Projekt „Virtual Plants“. Gemäß den Forschungsschwerpunkten sollte im Rahmen des Projektes durch die Simulation der strukturellen Entwicklung von Pflanzenindividuen ein effektives Instrument für Forschung und Lehre geschaffen werden (ROOM et al., 1996; PRUSINKIEWICZ et al., 1996). Dabei wurde angestrebt, die Lücke zwischen Untersuchungen auf der physiologischen Ebene und solchen auf Bestandesebene durch Untersuchungen am Pflanzenindividuum zu schließen. Um die dabei angestrebte modellhafte Darstellung der Morphogenese aufstellen und validieren zu können, mussten zunächst reale Daten an den untersuchten Pflanzen erhoben werden. Die für die Messungen entwickelte Software wird bei HANAN und ROOM (1997) vorgestellt.

Eingesetzt wurde das Messverfahren bei verschiedenen landwirtschaftlichen Nutzpflanzen (zum Beispiel Mais, Bohnen und Baumwolle). Bei diesen, im Vergleich zu Baumpflanzen recht schematisch strukturierten Gewächsen, erwies sich das Verfahren als erfolgreich einsetzbar. Da der Schwerpunkt des Virtual-Plants-Projektes auf der Simulation des Wachstums und nicht der Pflanzenmessung an sich liegt, wurden allerdings keine genauen Angaben betreffend der in der Praxis erreichbaren Genauigkeit des Verfahrens publiziert. Ansonsten ist die Tauglichkeit dieser Methode für den angestrebten Einsatzbereich ähnlich wie die der Magnetfeldmessung zu bewerten: Insbesondere die lange Aufnahmedauer direkt am Messobjekt ist als Hauptnachteil dieses nicht-kontaktlosen Verfahrens zu sehen.

2.2.4 Tomographische Methoden und Radar

Verfahrensbeschreibung

Tomographische Methoden sind vor allem aus medizinischen Anwendungen (Stichwort Kernspintomographie) bekannt, können aber auch zu anderen Zwecken eingesetzt werden. Einen guten Einblick in verschiedene Verfahren erhält man auf den Internet-Seiten der Harvard Medical School [5], allerdings mit Schwerpunktsetzung bei der Anwendung in der Neurochirurgie. Es werden drei verschiedene Verfahrensweisen unterschieden:

- CT - Computertomographie mit Röntgenstrahlen: Röntgenstrahlen ermitteln aus verschiedenen Richtungen die Konsistenz des Gewebes, durch entsprechende Algorithmen werden aus diesen Einzelaufnahmen dreidimensionale Gesamtbilder gebildet

- MRI - Magnetic Resonance Imaging (NMR, MR): Durch den Einsatz zweier unterschiedlicher magnetischer Felder werden die Protonen des Gewebes dazu veranlasst, elektromagnetische Schwingungen auszustrahlen. Die Art dieser elektromagnetischen Ausstrahlungen ist von der Mikroumgebung des Protons abhängig. Da zwei leicht unterschiedlich gestaltete Magnetfelder benutzt werden, hat jeder Punkt im Raum eine eindeutige Frequenz, wodurch die räumliche Erfassung möglich wird.

- SPECT/PET - Single Photon/Positron Emission Computed Tomography: Diese Variante setzt den Einsatz radioaktiver Tracer voraus, deren Photonenemissionen dann ähnlich wie Röntgenstrahlen erfasst werden können.

Tomographische Methoden werden oft eingesetzt, wenn es darum geht, nicht nur das Äußere von Messobjekten (wozu natürlich auch Patienten zählen) zu erfassen, sondern insbesondere zerstörungsfrei einen Blick ins Innere zu werfen (Gewebestrukturen usw.).

Eignung für die Pflanzenvermessung

Tomographische Methoden sind prinzipiell wesentlich besser als alle vorangehend beschriebenen Messoptionen geeignet, um auch überdeckte Objektbestandteile zu vermessen. Daher eröffnet diese Methodik zusätzlich die Möglichkeit, auch innere Strukturen der Pflanzen problemlos zu erfassen. Insbesondere aus diesem Grund wird die Tomographie auch bereits im holzkundlichen Bereich angewandt (FROMM et al., 2001). Für den Einsatz zur Pflanzenvermessung wäre dieses Verfahren also grundsätzlich geeignet und würde sogar deutlich mehr Informationen über das Messobjekt bereitstellen, als im Rahmen des vorliegenden Projektes nötig.

Diesen Vorteilen stehen aber auch Nachteile entgegen: So können mit Hilfe der Tomographie, die meist komplizierte, ortsgebundene Messgeräte erfordert, nur getopfte Pflanzen bis zu einer gewissen Größe vermessen werden, Freilandaufnahmen stehen, anders als bei Radarmessungen, nicht zur Debatte. Den größte Nachteil dürften jedoch die enorm hohen Anschaffungskosten für derartige Geräte (mehrere 100.000 EUR) und damit verbunden auch die hohen Kosten für einzelne Aufnahmesessions darstellen. Man muss sich gut überlegen, ob diese Investition in einem sinnvollen Verhältnis zu dem erwünschten Datenmaterial steht.

Für die vorgegebene Themenstellung ist dies nicht der Fall. Aus diesem Grund wurde auf eine weitere Evaluierung dieser Messoptionen verzichtet. Erwähnt werden muss sie im Rahmen dieses Überblicks allerdings schon, da zum einen die prinzipielle Eignung durchaus gegeben ist, und zum anderen, da für spezielle Messaufgaben, insbesondere wenn die Erfassung des Holzgewebes gewünscht ist, der Einsatz der Tomographie durchaus als geeignetes Messverfahren zu beurteilen ist.

An dieser Stelle sei auch noch auf den möglichen Einsatz von Radar zur Gewinnung räumlicher Daten hingewiesen. Dieses Verfahren ist vom technischen und finanziellen Aufwand auf einem ähnlich hohen Niveau wie die Tomographie angesiedelt. Bezüglich des Einsatzes im Forstbereich kann auf die Untersuchungen von HRUSKA et al. (1999) sowie BUTNOR et al. (2001) verwiesen werden, welche einen bodendurchdringenden Radar (GPR[4]) zur Analyse von Wurzelsystemen verwendeten. Derartige Untersuchungen erlauben allerdings keine automatisierten Aussagen über die Wurzelstruktur einzelner Pflanzenindividuen, sondern dienen eher der Betrachtung einer bestimmten Bodeneinheit als Ganzes.

4 GPR: Ground penetrating radar.

2.2.5 Aktive optische Verfahren

Die diversen optischen Mess- und Datenerfassungsverfahren werden in *aktive* und *passive* unterteilt. Dieser Abschnitt befasst sich zunächst mit den aktiven Verfahren, den passiven Methoden der klassischen Photogrammmetrie ist Abschnitt II.2.2.6 gewidmet.

Die als aktiv klassifizierten Verfahren zeichnen sich durch den Einsatz einer aktiven Lichtquelle, zum Beispiel Laser oder Weißlicht, aus. Die im Folgenden vorgenommene weitere Aufteilung in unterschiedliche Messprinzipien ist aufgrund der Überschneidungen und der zahlreichen technischen Fortschritte auf dem Gebiet der aktiven optischen Verfahren unvollständig und teilweise nicht immer eindeutig. Zudem existieren auch zahlreiche fließende Übergänge zwischen aktiven und passiven Verfahren, so zum Beispiel die Messungen mittels strukturiertem Licht, welche trotz des Einsatzes einer „aktiven" Lichtquelle oft als Sonderfall der Photogrammmetrie betrachtet werden. Auch in der entsprechenden Fachliteratur ist deswegen die genaue Einteilung zum Teil uneinheitlich. So behandelt zum Beispiel KRAUS (1996, S. 426ff) diese Verfahren - anders als die Lasertechniken - unter dem Oberbegriff der Photogrammmetrie, während hingegen WOLF (1999) den Einsatz von strukturiertem Licht eher mit den Laserverfahren zusammenfasst. Die im Folgenden vorgenommene Klassifizierung ist daher nur als eine vom mehreren Möglichkeiten anzusehen, die Vielzahl optischer Verfahren übersichtlich zu kategorisieren.

2.2.5.1 Laser und Weißlicht

Verfahrensbeschreibung

Die Laservermessung, beziehungsweise das relativ ähnliche Verfahren mit Weißlicht, wird hauptsächlich im industriellen Bereich eingesetzt. Sie erlaubt eine hohe Genauigkeit (je nach verwendeter Technologie im µm-Bereich), lässt sich aber am besten unter den relativ definierten Bedingungen stationärer Anwendung innerhalb von industriellen Fertigungsanlagen einsetzen: Dabei ist der Laser ortsgebunden und das zu scannende Objekt wird, auf einem Fließband, einem Drehteller oder einer ähnlichen Vorrichtung, an ihm vorbeigeführt. Stationäre Lasergeräte erlauben höchste Präzisionsmessungen, sind allerdings im forstlichen Bereich kaum einsetzbar. Derartige stationäre Laser mit unterschiedlichen Einsatzschwerpunkten (Multimedia bis Industrievermessung) gibt es von den unterschiedlichsten Herstellern. Interessant für den mobilen Einsatz sind tragbare Laserscanner: Diese erlauben eine einfache Erfassung räumlicher Modelle. Hier wird das zu scannende Objekt mit dem Laser wie mit einer Spraydose „abgesprüht".

Als Ergebnis eines Laserscanners erhält man ein dreidimensionales Volumenmodell des Objektes, je nach Details der verwendeten Technologie sogar mit Farbtexturen. Die Erfassung dieser Oberflächeninformation wird dabei meist erreicht durch die Kombination konventioneller Fotoaufnahmen der Objektoberfläche parallel zum eigentlichen Scannen mit dem Laser. Somit wäre eigentlich ein Laserscanner, insbesondere in portabler Ausführung, eine geeignete Lösung für die Vermessung zumindest kleinerer Bäume, sowohl von der theoretischen Genauigkeit, als auch von der einfachen Anwendbarkeit her gesehen.

Eignung für die Pflanzenvermessung

Laserscanner sind in der Industrie das Mittel der Wahl, wenn es gilt, auch relativ komplexe Objekte schnell und mit höchster Genauigkeit zu vermessen. Neben den weit verbreiteten stationären Aus-

führungen derartiger Geräte sind inzwischen, wie vorangehend angesprochen, auch handliche, tragbare Varianten erhältlich, die trotz ihrer Portabilität nur geringfügige Einschränkungen bei der Messgenauigkeit mit sich bringen. Somit liegt der Gedanke nahe, derartige Gerätschaften auch für die Vermessung an Pflanzen einzusetzen.

Ein tragbares Exemplar für Präzisionsmessungen stellt zum Beispiel der *FastScan Handheld Laser Scanner* (*HLS*) im Vertrieb der Firma *Polhemus* (Internet-URL: [14]) dar. Dieser erreicht eine Genauigkeit von etwa 0,5 mm (bei 20 cm Scanentfernung) und ist für etwa 40.000 EUR zu haben. Auch für die Genauigkeitsansprüche von wissenschaftlichen Untersuchungen erwies sich dieses Gerät als ausreichend: Neben den üblichen Einsatzbereichen in Technik und Multimedia führt der Hersteller auch einige wissenschaftliche Projekte als Referenzanwendungen dieses Gerätes auf, bei denen der *HLS* zur räumlichen Erfassung und Vermessung zum Einsatz kam. Dazu gehören unter anderem archäologischen Untersuchung (Einscannen von Statuen) und das Vermessen von Tierkörpern (durch Forscher des „Meat Industry Research Institute Neuseeland“).

Da das Gerät sich somit bei der Erfassung zumindest einfacherer organischer Körper unter wissenschaftlichen Prämissen bereits bewährt hat, erscheint es prinzipiell auch als eine geeignete Option zum Erfassen anderer derartiger Objekte, wie eben Baumpflanzen. Die Firma *Polhemus* war auf Anfrage freundlicherweise bereit, ihr Gerät für das geplante Einsatzgebiet auszutesten. Die Untersuchungen hierfür wurden direkt vom Hersteller am Firmensitz in den USA, also durchaus unter optimierten Bedingungen, durchgeführt. Sowohl Laub- als auch Nadelbaumpflanzen wurden dabei probeweise erfasst. Prinzipielle Probleme der Lasertechnik mit reflektierenden Objektbestandteilen („Speckles“, siehe WOLF, 1999), wie es bei Baumpflanzen bei Blattoberflächen vorkommen kann, konnten durch einfache Methoden, wie zum Beispiel Kalkung, behoben werden.

Die durch die Messung erhaltenen Volumenobjekte waren, wie der Hersteller nach diesen Versuchen mitteilte, dennoch praktisch nicht weiter verwertbar. Es stellte sich heraus, dass die verwendete Lasertechnologie, obwohl im industriellen Umfeld für Präzisionsmessungen hervorragend geeignet, an dem komplexen Objekt „Baumpflanze“ immer noch scheitert.

Das Hauptproblem war dabei die Erfassung der Belaubung, insbesondere die scharfkantigen Blattkanten bei Laubbäumen sowie die Differenzierung einzelner Nadeln bei Nadelbäumen. Aber auch wenn man auf eine Messung der Belaubung (zum Beispiel Laubbäume im Winterzustand) verzichtete, zeigte es sich, dass die gebogenen Oberflächen von Zweigen und Ästen dem Scanner Schwierigkeiten bereiten. Bei komplexeren Formen kommt, wie bei einem optischen Verfahren nicht anders zu erwarten, zudem die Problematik der Überdeckungen und Überschneidungen zum Tragen.

Alles in allem erwies sich das Verfahren somit zwar als bedingt tauglich für die Vermessung von Baumpflanzen im Winterzustand, allerdings steht das erreichbare Resultat dann nicht im Verhältnis zu den notwendigen hohen Investitionen, welche sich im Regelfall auf mehrere 10.000 EUR belaufen. Für die weiteren Untersuchungen im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde daher die Lasertechnik nicht weiter berücksichtigt.

Dies heißt allerdings nicht, dass diese Technik nicht früher oder später für derartige Aufgabenstellung interessant werden könnte. So gibt es zum Beispiel inzwischen sehr preisgünstige 3D-Messgeräte auf Laserbasis, natürlich mit Einschränkungen bezüglich Objektgröße und Genauigkeit. Diese Geräte (siehe dazu zum Beispiel Internet-URL [16]) sind schon ab etwa 200 EUR zu haben. Sie weisen zwar theoretisch (nach Herstellerangaben) eine Genauigkeit von drei Millimetern bei einer Auflösung von sogar unter einem Millimeter auf, erweisen sich allerdings im praktischen Einsatz eher als Spielerei, wie RINK (1999) im Rahmen eines Testberichts feststellen musste. Daher kommt

der angesprochene Bericht zu dem Schluss, dass im 3D-Laserscanner-Bereich auch weiterhin Lösungen um die 15.000 EUR als „low-cost“ anzusehen sind.

2.2.5.2 Einsatz von strukturiertem Licht

Verfahrensbeschreibung

Die Verwendung von strukturiertem Licht ist als Sonderform der Nahbereichsphotogrammmetrie zu verstehen und steht somit, vereinfacht gesagt, auf einer Zwischenstufe zwischen aktiven und passiven optischen Verfahren. Gemäß Definition sind diese Verfahren wegen des Einsatzes einer aktiven Lichtquelle den aktiven optischen Verfahren zuzurechnen, in der Literatur werden sie allerdings oft im Zusammenhang mit den photogrammmetrischen Verfahren behandelt.

Man versteht darunter die Projektion von Mustern auf texturarme Oberflächen (KRAUS, 1996, S. 426ff). Dadurch wird auch auf eigentlich texturlosen oder -armen Oberflächen eine Texturierung gewährleistet, was die passiv-photogrammmetrische Erfassung von Oberflächendaten vereinfacht oder überhaupt erst möglich macht, zum Beispiel durch die Elimination des störenden Einflusses starker Schatten. Grundsätzlich existieren dabei unterschiedliche Verfahrensformen, von denen es allerdings noch zahlreiche Mischformen und Abwandlungen gibt. Allen Verfahren sind dabei die hohen Anforderungen an speziellen Erfassungsgerätschaften und Software gemeinsam. Im folgenden sollen die komplexen Details der einzelnen Verfahren nur kurz vorgestellt werden, genaueres ist der bereits genannten Literatur zu entnehmen.

Bei der *Musterprojektion* steht die reine Erzeugung von Texturen auf der Objektoberfläche im Vordergrund, eine konventionelle photogrammmetrische Aufnahmeanordnung wird also lediglich durch einen Musterprojektor für zufällige oder regelmäßige Muster ergänzt. Bei den *Lichtschnittverfahren* hingegen wird auf den Gegenstand ein einziges Lichtprofil in Form einer Linie projiziert. Dafür sind dann allerdings zahlreiche Aufnahmen notwendig, deswegen wird meist eine digitale Videokamera, synchronisiert mit dem Projektor, eingesetzt. Eine Variante dieses Verfahrens stellen die sogenannten *Phasenverschiebungsverfahren* („phase-shifting“), auch als *koaxiale* Verfahren bezeichnet, dar. Ähnlich kann die Vermessung auch mittels der Erzeugung vom *Moirémustern* erfolgen: Hierunter versteht man die Projektion von vielen parallelen Höhenlinien auf das zu vermessende Objekt. Am komplexesten, aber auch für stark strukturierte Oberflächen geeignet, ist der Einsatz von *binär kodiertem Licht*, bei dem schwarz-weiße Linienmuster mit bei jedem Projektionsdurchgang verdoppelter Frequenz eingesetzt werden.

Eignung für die Pflanzenvermessung

Wie einleitend schon dargelegt, handelt es sich beim Einsatz von strukturiertem Licht um Verfahren, welche insbesondere für die Oberflächenvermessung eingesetzt werden: Es geht dabei also weniger um die Erfassung komplexer Strukturen, sondern um die Vermessung unregelmäßig geformter Oberflächen. Die spezielle Auslegung auf diesen Anwendungsfall schränkt natürlich die Verwendbarkeit für die bei Baumstrukturen erforderliche Rundum-Erfassung einer komplexen Struktur ein. Für die Pflanzenvermessung kommen die Musterprojektionsverfahren somit eigentlich kaum in Frage. Da die meisten darauf basierenden Verfahren preislich meist auch deutlich höher liegen als zum Beispiel die nachfolgend beschriebenen „reinen“ photogrammmetrischen Methoden, wurden sie im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen auch nicht weiter behandelt. Allerdings kann man in bestimmten Spezialfällen, die die Erfassung von Pflanzenoberflächen (Blattoberflächen, Rindenstruk-

tur) beinhalten, durchaus über den Einsatz derartiger Verfahren, insbesondere von binär kodiertem Licht, nachdenken.

2.2.6 Passive optische Verfahren - Photogrammmetrie

2.2.6.1 Einsatzgrundsätze der Photogrammmetrie

Die Photogrammmetrie ist ein schon lange praktiziertes Verfahren der Messtechnik. KRAUS (1997) nennt bereits das Jahr 1859 als das Entstehungsjahr der praktischen Photogrammmetrie, theoretische Gedanken hierzu reichen sogar noch weiter zurück. Man versteht unter der Bezeichnung „Photogrammmetrie" das Gewinnen von Informationen über Gegenstände, insbesondere natürlich deren Vermessung, anhand von Fotos. Je nach Verfahren benötigt man als Ausgangsmaterial somit eine, zwei oder mehrere Aufnahmen des zu vermessenden Objektes, aufgenommen unter bestimmten, je nach Verfahrensweise unterschiedlichen Voraussetzungen. Im Rahmen der gegebenen Aufgabenstellung ist vor allem der Bereich der Nahbereichsphotogrammmetrie („close-range photogrammetry", terrestrische Photogrammmetrie) von Interesse.

Die Photogrammmetrie ist insbesondere deswegen für den gegebenen Aufgabenbereich hochinteressant, weil sie die einfachste Messdatengewinnung (einfach „Fotos machen") bei prinzipbedingt völliger Kontaktlosigkeit ermöglicht. Deswegen sollen in den nächsten Absätzen kurz die den diversen photogrammmetrischen Verfahren gemeinsamen Grundlagen erläutert werden, bevor einzelne Methoden im Detail vorgestellt werden.

a) Kameratechnik

Prinzipiell ist in der Photogrammmetrie das verwendete Aufnahmegerät, also der Fotoapparat, der entscheidende Punkt des Verfahrens. Die Qualität der erhobenen Daten hängt maßgeblich von der Genauigkeit der verwendeten Fototechnik ab. Es sollen daher zunächst die Merkmale und Prinzipien verschiedener einsetzbarer Kameratypen (Tabelle 3) erläutert werden, um ihre jeweilige Tauglichkeit für die photogrammmetrische Vermessung von Baumpflanzen einschätzen zu können. Im Folgenden soll dabei allerdings nur auf die im Rahmen dieser Arbeit benötigten Erdbildmesskameras eingegangen werden. Luftbildmesskameras müssen für ihren speziellen Einsatzbereich weiteren, besonderen Anforderungsprofilen genügen (KRAUS, 1997, S. 96ff).

Tabelle 3: Unterscheidungskriterien für die im Rahmen der Photogrammmetrie eingesetzten unterschiedlichen Kameratechniken.

Unterscheidungskriterium	**Bezeichnung der Gerätekategorie**		
Photogrammmetrischer Einsatzbereich	Erdbildmesskamera	Luftbildmesskamera	
Anpassung an die Genauigkeitsanforderungen in der Photogrammmetrie	Messkamera	Teilmesskamera	Nicht-Messkamera
Art der Bildspeicherung	Analog	Digital	

Die Photogrammmetrie teilt die verwendeten Kameras vorwiegend nach der jeweiligen Eignung für ihre Belange ein: Zum einen echte Messkameras („metric cameras"), welche speziell für die Photogrammmetrie entwickelt wurden, zum anderen „Nicht-Messkameras" („non-metric cameras"). Zu letzterer Kategorie sind sämtliche für den „Alltags"-Einsatz verfügbaren Apparate zu rechnen. Bei einem Einsatz für photogrammmetrische Zwecke ist hier mit teilweise deutlichen Einschränkungen

bezüglich der erreichbaren Genauigkeit zu rechnen. Eine Zwischenstellung nehmen die Teilmesskameras („partial-metric cameras“) ein, darunter versteht man Nicht-Messkameras, die aber soweit als möglich für die Belange der Photogrammmetrie modifiziert und geeicht worden sind. REIDELSTÜRZ (1997, S. 40ff) beschreibt die Genauigkeit verschiedener Typen analoger Fotoapparate beim photogrammmetrischen Einsatz. Dabei zeigt sich, dass auch mit Nicht-Messkameras durchaus hohe Genauigkeiten erzielt werden können, sofern eine entsprechend angepasste Vorgehensweise gewählt wird (siehe dazu die Ausführungen zur Kamerakalibrierung später in diesem Kapitel). Diese Überlegung ist insofern bedeutsam, da spezielle photogrammmetrische Messkameras deutlich teurer sind als handelsübliche Apparate.

Ein weiterer wichtiger grundsätzlicher Unterschied zwischen den Kameratypen betrifft die Art und Weise der Bildaufzeichnung - es werden analoge und die in letzter Zeit immer größere Marktanteile gewinnenden digitalen Kameras unterschieden. Auf die Unterschiede und deren Bedeutung für den Einsatz als Messkamera wird in den folgenden Absätzen näher eingegangen.

Analoge Fotografie

In herkömmlichen analogen Kameras dient zur Aufzeichnung des Bildes der Film, bei dem eine lichtempfindliche Filmemulsion das Negativ festhält. In weiteren Schritten muss dieser Film noch entwickelt werden, um das Positivbild (in Form eines Fotoabzuges oder Dias) zu erhalten. KRAUS (1997, S. 41ff) hat die der analogen Fotographie zugrunde liegenden Prinzipien, sowohl für die Schwarzweiß- als auch die Farbfotographie, zusammengefasst. Hauptvorteil der Analogtechnik ist ihre hohe Auflösung: Nach SEETZEN und LOEBICH (1999) liefert bereits ein standardisierter Kleinbildfilm (ISO 100) eine Abbildungsqualität, welche einem Computerbild mit 12 Millionen Pixeln[5] Auflösung entspricht, spezielle Mittelformat-Rollenfilme im 6 x 6 cm-Format bilden sogar über 35 Millionen Pixel (das heißt etwa 6000 x 6000 Bildpunkte) ab. Deswegen sind hochwertige analoge Messkameras auch im Zeitalter der digitalen Fotografie bislang immer noch Mittel der Wahl für höchste Genauigkeiten gerade bei der Photogrammmetrie. Allerdings ist absehbar, dass die einfacher zu handhabende Digitaltechnik bald auch im Profibereich die dominierende Rolle einnehmen wird (SEETZEN, 1998).

Die auf analoge Weise erhaltenen Bilder sind zwar für analoge Auswertungen sofort weiter verwendbar. Für eine computerunterstützte Photogrammmetrie - welche den Einsatz aufwändiger analoger Auswertemethoden zunehmend ersetzt - müssen sie allerdings erst in digitale Grafiken in einem geeigneten Format überführt werden. Um die von der Aufnahmetechnik erreichbare hohe Auflösung beizubehalten, muss für photogrammmetrische Zielsetzungen auch bei diesen Schritten auf hochwertige Geräte Wert gelegt werden, eine grundsätzliche Problematik der Analogtechnik.

Der gebräuchlichste Weg hierzu ist der Einsatz von Scannern. Werden die Bilder als normale Fotoabzüge entwickelt, so müssen hochwertige (und teure) Flachbettscanner eingesetzt werden, die eine adäquate optische Auflösung bieten. Liegen die Bilder in Form von Dias vor, so kommen entweder Durchlichtaufsätze für herkömmliche Scanner zum Einsatz, oder, wie für hohe Genauigkeitsansprüche empfehlenswert, spezielle Diascanner. Eine weitere Methode ist der Rückgriff auf Scan-Dienstleistungen (SEETZEN, 1999). Bekanntestes Beispiel hierfür ist die von der Firma *Kodak* entwickelte Photo-CD, bei der der Fotograf die entwickelten Fotos direkt computerlesbar auf CD in Formaten von bis zu 3072 x 2048 Pixels (in einer speziellen „Pro“-Variante sogar vervierfacht auf 6144 x 4096) erhält.

5 Pixel: Kunstwort für „picture element“, kleinste Einheit einer Computergrafik.

Aus den obigen Ausführungen geht hervor, dass der Hauptvorteil herkömmlicher analoger Kameras in der erreichbaren Auflösung und der daraus folgenden hohen Genauigkeit der photogrammmetrischen Auswertung liegt. Dieser Vorteil wird noch dadurch verstärkt, dass die Kameraproduzenten ihre digitalen Modelle momentan vor allem für den Consumer-Markt auslegen. Die hochwertigen Bauteile (Objektiv etc.) werden dagegen vorwiegend für die auf den professionellen Einsatz ausgelegten Analoggeräte verwendet. Die Konsistenz der inneren Orientierung (Erklärung siehe folgende Seiten) hängt aber maßgeblich von der Verarbeitungsqualität der Kamera ab. Mit zunehmender Reifung der digitalen Fototechnik zeichnet sich jedoch mehr und mehr eine Änderung dieser Situation ab. Zahlreiche Hersteller auch hochwertiger Kameras setzen inzwischen auf die Digitaltechnik (BLEUL, 2001).

Digitale Fotografie

Das wie oben beschrieben analog erstellte Foto steht nicht sofort für die Weiterverarbeitung zur Verfügung, gerade wenn diese computergestützt erfolgen soll. Von der Aufnahme bis zum fertigen Bild sind hier zusätzliche Arbeitsschritte und Wartezeiten von mehreren Tagen einzukalkulieren. Zudem ist bei allen Zwischenschritten zwischen analoger Aufnahme und photogrammmetrischer Weiterverarbeitung der Einsatz entsprechend hochwertiger Verfahren nötig, um den Genauigkeitsvorteil der Analogfotografie überhaupt zu erhalten. Bei digitalen Kameras entfällt der vorgehend beschriebene, aufwändige Zwischenschritt des Einlesens der Bilder für die in der Regel notwendige Weiterverarbeitung am Computer. Die Daten liegen sofort in einem computerverwertbaren Format vor, die photogrammmetrische Auswertung kann unverzüglich erfolgen.

Im Prinzip unterscheiden sich Digitalkameras zunächst einmal nicht sonderlich von analogen Modellen. Vereinfacht gesagt fällt nur die Filmemulsion als „Speicherplatz“ für die aufgenommenen Bilder weg, statt dessen kommen sogenannte CCD-Chips[6] zum Einsatz. Diese bestehen aus einer Matrix von lichtempfindlichen Elementen, deren Anzahl gleichzeitig auch die Auflösung der Kamera vorgibt. Ein CCD-Chip kann Farbwerte im allgemeinen in 24 Bit Farbtiefe[7] erfassen, beziehungsweise im Falle von Schwarzweiß-Aufnahmen 256 Graustufen in 8 Bit Tiefe (BLEUL, 2001). Die Bilder sind so direkt am Computer weiter verwendbar. Genaueres zur Entwicklung und Funktionsweise der CCD-Technik findet sich bei MEYER (1998) oder KRAUS (1997, S. 338ff).

Da die Lichtempfindlichkeit dieser Sensoren allerdings geringer ist als die von konventionellen Filmen, sind an das Objektiv von digitalen Kameras wesentlich andere beziehungsweise auch höhere Ansprüche zu stellen (SEETZEN, 1998). Kleinbildobjektive brauchen lediglich eine Auflösung vom 100 Linienpaaren / mm, um den Abbildungsfähigkeiten hochwertiger Filmemulsion zu genügen[8], für die Sensorpixel von Digitalkameras beträgt dieser Mindestwert 150. Bislang setzten die Hersteller allerdings, wie bereits angemerkt, für ihre analogen Top-Modelle noch höherwertige Bauteile ein als für die eher für den Massenmarkt konzipierten Digitalkameras. Erst in letzter Zeit kommen vermehrt digitale Ausführungen mit hochwertiger, auch den Ansprüchen professioneller Fotografen genügender Ausstattung (Spiegelreflex, manuelle Blendensteuerung usw.) auf den Markt.

6 CCD: Charge Coupled Device.

7 Jeweils 8 Bit Farbtiefe (256 Intensitätsstufen) für die Grundfarben Rot, Grün und Blau ergeben 16,8 Millionen daraus mischbare Farbtöne. Laut gängiger Forschung sind dies mehr Farbnuancen, als das menschliche Auge unterscheiden kann. Daher sind höhere Farbauflösungen nur dann nötig, wenn man eine gewisse Reserve für eventuelle Nachbearbeitungen haben will.

8 Der Begriff „Linienpaare“ bedeutet untereinander liegende, abwechselnd schwarze und weiße Linien, die als klar aufgelöstes Muster erkenntlich sein müssen. Je höher dieser Wert, desto deutlicher können auch kleine Details dargestellt werden.

Die Auflösung digitaler Kameras nimmt - bei gleichzeitig fallenden Preisen - ständig zu. Die Bezeichnung für das Aufnahmeformat orientiert sich dabei meist an den gängigen Auflösungsstufen für Computer-Grafikkomponenten (VGA 640 x 480, SVGA 800 x 600, XGA 1.024 x 768 Pixel etc.). Professionelle, hochauflösende Digitalkameras, die auch für die Photogrammmetrie bei höchsten Anforderungen an die Genauigkeit eingesetzt werden, bewegen sich allerdings immer noch im Preisrahmen von mehreren zehntausend EUR (zum Beispiel Kodak DCS 460 mit 3.060 x 2.036 Pixel Auflösung für etwa 50.000 DEM im Jahr 1998) und erreichen dabei immer noch nicht vollständig die Auflösung von analogen Modellen. Die Technik entwickelt sich allerdings gerade in diesem Bereich schnell weiter: Noch 1997 bildeten VGA-Kameras die Masse der eingesetzten Modelle, gegenwärtig (Anfang 2002) werden Pixelauflösungen im 1,5 - 2-Megapixel-Bereich mit Formaten von beispielsweise 1.600 x 1.200 Pixels bereits als unterer Standard auch im Consumer-Bereich angesehen, die obere Leistungsklasse wird durch 4-Megapixel-Geräte markiert. Ein Ende dieses Trends zu mehr Auflösung für weniger Geld ist noch nicht abzusehen.

Bei derart hohen Auflösungen fallen allerdings auch enorme Datenmengen für die einzelnen Bilder an. Besteht ein Bild in VGA-Auflösung bei 16,8 Millionen Farben bereits aus knapp einem Megabyte Daten, so sind es bei den oben angesprochenen 2-Megapixel-Geräten schon deutlich über fünf Megabyte bei beispielsweise 1.600 x 1.200 Pixel Auflösung. Es stellt sich daher Frage, in welchem Format die Bilder gespeichert werden sollen. Dabei werden drei Arten der Bildspeicherung unterschieden: Unkomprimierte (Roh-)Daten, verlustfrei komprimierte Daten und verlustbehaftete Kompression. Die Reihenfolge dieser Aufzählung gibt gleichzeitig den sinkenden Speicherbedarf für die Bilddaten wieder. Während allerdings bei verlustfreier Kompression die ursprüngliche Rohdaten exakt wiederhergestellt werden können, werden bei verlustbehafteten Verfahren, wie etwa dem bekannten JPEG-Format, Bilddetails weggelassen, welche nach psychologischen Untersuchungen für die menschliche Wahrnehmung irrelevant sind, es gehen also Bildinformationen verloren. Letzteres ist aufgrund der enormen Speicherplatzersparnis (der Kompressionsfaktor ist hier - unter Inkaufnahme abnehmender Bildqualität - fast stufenlos steigerbar) bei gebräuchlichen Digitalkameras für den Massenmarkt am weitesten verbreitet, bringt aber für photogrammmetrische Zwecke zusätzliche Ungenauigkeiten mit sich. Neben proprietären Formaten einzelner Hersteller, wie dem FlashPix-Format von *Kodak*, kommen daher für die digitale Bildverarbeitung vorwiegend unkomprimierte beziehungsweise verlustfrei komprimierte Formate wie *Windows*-Bitmap (`*.BMP`), Targa (`*.TGA`) oder TIFF (`*.TIF`) zum Einsatz.

Als geeignetes Speichermedium für diese Bilder sind verschiedene Verfahren in der Diskussion (MEYER, 1997; JÜRGENS, 1998; SEETZEN und STEIN, 2000). Wichtigste Kriterien sind dabei geringer Stromverbrauch, handliche Größe und Schockfestigkeit bei gleichzeitig möglichst hoher Speicherkapazität. Aktuelle Digitalkameras verwenden hierzu meist Flashmemory-Karten oder Mini-Festplatten im von Notebooks her bekannten PC-Card Format, beziehungsweise teilweise herstellerspezifische Abwandlungen hiervon (CompactFlash, SmartMedia usw.). Die Verbindung zum Computer, die früher weitgehend über die in Anbetracht des Datenaufkommens sehr langsame serielle Schnittstelle (RS-232C) beziehungsweise bei Profigeräten über SCSI lief, wird in zunehmenden Maße über den USB-Anschluss[9] aktueller PCs realisiert.

Bezüglich der erreichbaren Genauigkeit sind Digitalkameras im Vergleich zu gleich teuren analogen Verwandten, wie bereits dargelegt, zur Zeit in der Regel noch etwas unterlegen, ein Zu-

9 SCSI: „Small Computer System Interface“ - Paralleles Schnittstellensystem für schnelle (interne und externe) Peripheriegeräte, hauptsächlich eingesetzt für Festplatten, aber auch für hochwertige Scanner und Digitalkameras.
USB: „Universal Serial Bus“ - Serielle Schnittstelle, in der momentan vorherrschenden Version 1.0 für langsame bis mittelschnelle externe Computerperipherie vorgesehen.
RS232C: Klassische, relativ langsame und veraltete, aber weit verbreitete serielle Schnittstelle.

stand, der sich aufgrund des technischen Fortschrittes allerdings bald ändern dürfte. Insbesondere die leichtere Handhabung und die sofortige Verfügbarkeit des Bildmaterials in computertauglicher Form sprechen hingegen für die Digitalkameras. Es sei an dieser Stelle noch einmal auf die Artikel von SEETZEN (1998) sowie SEETZEN und LOEBICH (1999) hingewiesen, in denen grundsätzliche Unterschiede zwischen digitaler und analoger Technik bei der Fotografie ausführlich dargelegt werden.

b) Das physikalische Modell der Fotografie

Zwar hat handelsübliche Photogrammmetrie-Software heutzutage einen Stand der Bedienerfreundlichkeit erreicht, bei dem in Standardsituationen bereits mit nur oberflächlichen Kenntnissen der zugrunde liegenden physikalischen Gesetzmäßigkeiten befriedigende Messergebnisse erzielt werden können. Bei der Vermessung von Bäumen handelt es sich jedoch, wie bereits erläutert, um eine äußerst komplexe Messsituation. Auf die Kenntnis der spezifischen Stärken und Schwächen der einzelnen Verfahren ist deswegen in diesem Fall besonders Wert zu legen, um eine zielgerichtete, an die ungewöhnliche Aufgabenstellung angepasste Vorgehensweise gewährleisten zu können. Die Kenntnis der grundlegenden physikalischen Zusammenhänge ist für das Erzielen optimaler Messresultate somit als unabdingbare Voraussetzung anzusehen. Deswegen soll nun ein kurzer Überblick über die Modellvorstellungen der geometrischen Abbildungsgesetze gegeben werden.

Stark vereinfacht betrachtet kann eine Fotoaufnahme, egal ob analog oder digital, als hinreichend genaue Zentralprojektion des fotografierten Objektes auf ein zweidimensionales Negativbild betrachtet werden (KRAUS, 1997). Diese Modellvorstellung der geometrischen Abbildungsgesetze der Fotografie soll im Folgenden vorgestellt werden, insbesondere im Hinblick auf die Anwendung dieser physikalischen Gegebenheiten zu einer dreidimensionalen Auswertung der Bildinformationen.

Die grundsätzliche Aufnahmesituation stellt sich zunächst einmal so dar, wie es in Abbildung 3 schematisch dargestellt wird: Vom Kamerastandort O aus, der im willkürlich festgesetzten lokalen Koordinatensystem die 3D-Koordinaten x_0,y_0 und z_0 hat[10], wird eine Aufnahme des Objektes, in diesem Fall eines Baumes, gemacht. Jeder sichtbare räumliche Punkt des Objektes wird zweidimensional auf der Positiv-Bildebene der Kamera repräsentiert, und zwar als Schnittpunkt des Vektors Objektpunkt - Kamerastandort O mit diesem Positivbild. Im Fall des Objektpunktes „Baumspitze“ P mit den Koordinaten x, y und z beispielsweise schneidet die Gerade $\overline{OP}$ die Positiv-Ebene im Punkt P'. Als Ursprung des zweidimensionalen Koordinatensystems des Positiv-Messbildes dient dabei dessen geometrischer Mittelpunkt M, der Punkt P' wird in den zweidimensionalen Koordinaten ξ und η angegeben. Durch die Verwendung griechischer Buchstaben wird dabei verdeutlicht, dass es sich bei Bildkoordinatensystem und Objektkoordinatensystem um unterschiedliche und voneinander unabhängige Einheiten handelt.

10 In den verwendeten 3D-Koordinatensystemen stellen die x- und y-Achse im Folgenden immer die Horizontalebene dar, während die z-Achse die Höhe repräsentiert.

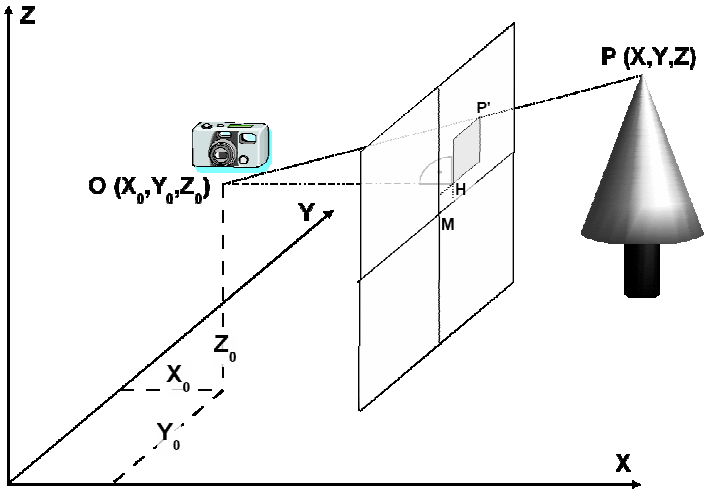

Abbildung 3: Räumliche Zusammenhänge bei der fotografischen Aufnahme eines Objektes (angelehnt an KRAUS, 1997, S. 14).

Diese Positivebene stellt somit ein zweidimensionales Abbild der dreidimensionalen Realität dar. Abbildung 4 gibt diesen Sachverhalt noch etwas konkreter wieder: Es ist nämlich weiterhin zu beachten, dass das Lot vom Projektionszentrum O auf die Positivebene nicht notwendigerweise mit deren geometrischen Mittelpunkt M zusammenfallen muss. Der tatsächliche Fußpunkt dieses Lots wird daher als Bildhauptpunkt H mit den Bildkoordinaten ε_0 und η_0 bezeichnet. Diese Diskrepanz zwischen Bildmittelpunkt und Bildhauptpunkt ergibt sich aus unvermeidbaren Konstruktionsmängeln bei der Herstellung der Kameraoptik und ist eine maßgebliche Kennzahl für die Kameraeigenschaften. Wichtiger Parameter ist hierbei die Kamerakonstante c. Sie entspricht der Länge der Geraden $\overline{OH}$.

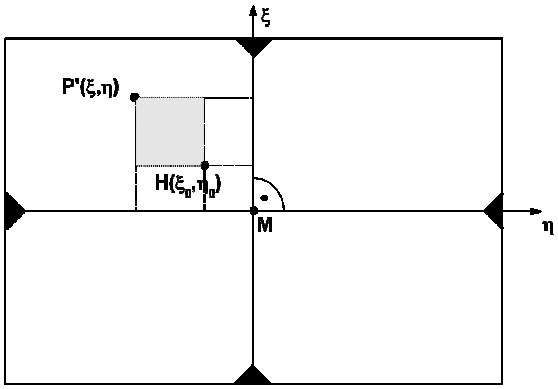

Abbildung 4: Detaildarstellung des Messbildes (angelehnt an KRAUS, 1997, S. 13).

Die Kameraoptik wurde bislang auch bezüglich der Unterscheidung Positiv-/Negativbild etwas vereinfacht dargestellt. Das tatsächlich aufgenommene Bild ist bekanntermaßen genau genommen nicht das vorangehend beschriebene Positivbild, sondern das zugehörige Negativ. Dieses ist, wie aus Abbildung 5 hervorgeht, das Resultat der Zentralprojektion des Aufnahmeobjektes (zweidimensional repräsentiert durch die Positivebene) über das Projektionszentrum O. Im vereinfachten Modell sind Positiv und Negativ gleichweit vom Projektionszentrum O entfernt, die Entfernung entspricht dabei der Kamerakonstante c.

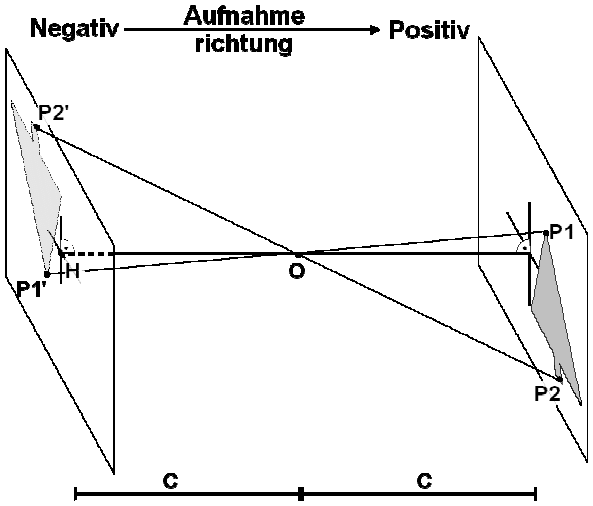

Abbildung 5: Positiv- und Negativdarstellung der 2D-Aufnahme in der Kamera.

Dieses vorangehend beschriebene, theoretische geometrische Modell entspricht allerdings der physikalischen Realität bei der von Ungenauigkeiten und Verzerrungen gekennzeichneten fotografischen Aufnahme nur sehr unzureichend. Fehler treten schon prinzipiell bei der in Abbildung 5 nur stark vereinfacht dargestellten Optik der Kamera auf, aber auch beim Messbild an sich. Die bei Luftaufnahmen zusätzlich auftretenden Fehler (durch atmosphärische Verzerrungen, Geschwindigkeit des Aufnahmeflugzeuges usw.) sollen dabei im Folgenden nicht weiter behandelt werden. Wichtig für die Verwendung einer Kamera als Messgerät ist daher die Kenntnis der jeweiligen Parameter der Orientierung. Diese Zusammenhänge sollen nun kurz dargestellt werden, um die Hintergründe der für jede photogrammmetrische Messung notwendigen Kamerakalibrierung aufzuzeigen und diese im praktischen Einsatz richtig durchführen zu können.

Die innere Orientierung der Messkamera

Unter der *inneren Orientierung* versteht man sämtliche Ungenauigkeiten beziehungsweise Bildverzerrungen, deren Ursache beim Fotoapparat an sich zu suchen sind. Die Elemente der inneren Orientierung legen dabei unter anderem die Lage des Projektionszentrums O in Bezug zur Bildebene fest. Ausgehend vom idealisierten Modell, wie es in den vorangehenden Abbildungen dargestellt wurde, bestimmen so lediglich drei Parameter die innere Orientierung, nämliche die Koordinaten des Bildhauptpunktes H (ε_0, η_0) sowie die Kamerakonstante c.

Allerdings ist, wie bereits angesprochen, die Realität deutlich komplexer, als es sich durch dieses relativ einfache Modell darstellen lässt. Zur Verdeutlichung stellt Abbildung 6, wiederum nur schematisch, die Optik einer einfachen Kamera dar. Man sieht, dass das in der vorherigen Darstellung einfach als O bezeichnete Projektionszentrum eigentlich nicht als einzelner Punkt zu sehen ist, sondern, bedingt durch die Konstruktion der Linse, in zwei Knotenpunkte K_1 (objektseitiges Projektionszentrum O) und K_2 (bildseitiges Projektionszentrum O') aufzuteilen ist. Die Kamerakonstante c entspricht der Brennweite b.

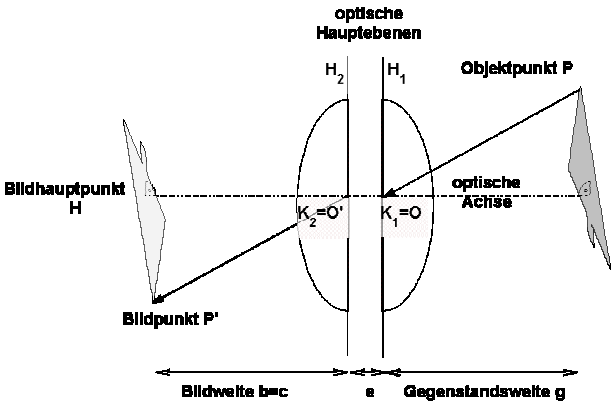

Abbildung 6: Idealisierte strahlenoptische Darstellung eines Kameraobjektivs (nach KRAUS, 1997, S. 29).

Weiter verkompliziert wird die Darstellung der physikalischen Vorgänge dadurch, dass die verwendeten Optiken, anders als in Abbildung 6 dargestellt, in der Regel meistens dicke, asymmetrisch Objekte aus unterschiedlichen Glassorten sind, so dass die Feststellung des physikalischen Projektionszentrums nicht immer einfach ist. Deswegen muss dieses Modell für messtechnische Zwecke noch weiter verfeinert werden, worauf hier nicht weiter eingegangen werden soll (siehe dazu KRAUS, 1997, S. 29ff). Je mehr Faktoren in das Modell mit aufgenommen werden, desto höher ist die für weitergehende photogrammmetrische Berechnungen erreichbare Genauigkeit. Dies gilt sowohl für analoge als auch digitale Aufnahmen. Die entsprechenden Algorithmen sind in heutzutage gängiger Photogrammmetriesoftware bereits fertig implementiert, trotzdem sollten zumindest die oben angeführten Grundlagen der Kalibrierung bekannt sein, um die jeweiligen Entzerrungsalgorithmen sinnvoll einsetzen zu können.

Die innere Orientierung des Messbildes

Aber auch das entstandene Bild an sich ist Quelle für weitere Ungenauigkeiten. Alle Arbeitsschritte zwischen Entnahme des Films und fertig entwickeltem Foto für die photogrammmetrische Auswertung fügen dabei weitere Ungenauigkeiten hinzu. Beim Einscannen von Bildern für eine digitale Weiterverarbeitung ist weiterhin auch dieser Prozess mit einzuberechnen. Eine detaillierte Übersicht über die bei analogen Aufnahmen auftretenden Ungenauigkeiten findet sich wiederum bei KRAUS, 1997, S. 37ff). Es wird hier deutlich, dass die hohe Genauigkeit analoger Fotoaufnahmen eine entsprechend sorgfältige und aufwändige Weiterverarbeitung benötigt, um auch für die photogrammmetrische Messung nutzbar zu sein

Auch bei digitalen Fotografien treten solche Ungenauigkeiten im Messbild auf. Da die entsprechenden Parameter beim Digitalbild aber aufgrund der bekannten Kenndaten der CCD-Einheit bekannt sind, lassen sie sich meist auch wieder einfach rechnerisch beseitigen. Bestimmende Einflussfaktoren, welche charakteristisch für diese Art der Fotografie sind, sind insbesondere die folgenden Parameter:

- Pixelausdehnung, also Länge und Breite eines einzelnen CCD-Bildelements als Quotient aus Ausdehnung des CCD-Feldes und Bildauflösung;

- Eventuelle Änderung des oben angesprochen „aspect ratio“, je nach verwendetem Speicherformat;

- Lichtempfindlichkeit der Sensoren, getrennt nach den Grundfarben Rot, Grün und Blau;

Die äußere Orientierung

Unter „äußerer Orientierung" versteht man die Einpassung der Kamerakoordinaten in ein übergeordnetes Bezugskoordinatensystem. Dies ist nicht für alle Anwendungsfälle der Photogrammmetrie nötig. Insbesondere in der Nahbereichsphotogrammmetrie verzichtet man darauf und bezieht sich nur auf ein relatives, selbst definiertes lokales Koordinatensystem als Maßstab. Man spricht dann von der *relativen äußeren Orientierung*. Gerade aber bei der Landesvermessung ist die Einpassung in ein übergeordnetes Koordinatensystem (*absolute äußere Orientierung*) ein wichtiger Bestandteil. Für die Vermessung von Baumpflanzen reicht in der Regel eine relative äußere Orientierung mit einem lokalen Koordinatensystem aus.

c) Die Kalibrierung

Unter Kalibrierung versteht man den Prozess der Wiederherstellung der inneren und äußeren Orientierung, also vereinfacht gesagt das Verfahren, um die oben angesprochenen Störungen für die photogrammmetrischen Untersuchungen wieder „herauszurechnen". Die Kalibrierung ist somit eine wichtige Vorbedingung für jede photogrammmetrische Untersuchung und ausschlaggebend für die Qualität der erfassten räumlichen Daten. Die Kenntnis zumindest der wichtigsten zugrunde liegenden physikalischen Gegebenheiten ist daher wichtig für die Schaffung optimaler Rahmenbedingungen für ein photogrammmetrisches Messprojekt.

Möglichkeiten der Kalibrierung

Der Standardfall der Kalibrierung bei der professionellen Photogrammmetrie liegt zunächst einmal in der Verwendung spezieller Messkameras. Bei diesen versuchen die Hersteller schon grundsätzlich durch den Einsatz hochwertiger Bauteile, den Bildmittelpunkt M und den Bildhauptpunkt H möglichst aufeinander liegen zu lassen. Dabei sollte die Kamera durch Verwendung hochwertiger Bauteile und sorgfältige Fertigung mechanisch stabil genug sein, um diesen Zustand auch über einen längeren Zeitraum hinweg zu halten. Abgesehen von diesen Maßnahmen von Seiten des Herstellers existieren zusätzlich verschiedene Verfahren, um die innere Orientierung der Kamera (und des Messbildes) herzustellen.

Gebräuchliche Messkameras enthalten zur Wiederherstellung der inneren Orientierung Passelemente, die auf jedes Bild mit aufgenommen werden: Bei *Rahmenmarkenkameras* erfolgt dies durch vier, acht oder auch mehr Markierungen des Rahmens. Bei *Rahmenkameras* hingegen ist der gesamte Rahmen markiert und die durch deren Schnittpunkt bestimmten Bildecken ersetzen die Rahmenmarken. Ist vor der Bildebene der Kamera ein Netz mit einem regelmäßigen Gitter (Kreuze im Abstand von 2 - 10 mm) angebracht, spricht man von einer *Reseaukamera*. Es ist aber auch möglich - natürlich unter Inkaufnahme einer verringerten Genauigkeit - handelsübliche Kameras zu modifizieren, damit auch hier die aufgenommenen Bilder Passelemente enthalten. Bei EOS SYSTEMS (2000, S. 96ff) wird beispielsweise beschrieben, wie man durch das Einpassen einer transparenten Folie mit aufgedruckten Passpunkten auf das Objektiv eine Teilmesskamera zum Einsatz in der Software *Photomodeler Pro* erstellt.

Arbeit mit nicht kalibrierten Kameras

In vielen Fällen muss allerdings mit nicht kalibrierten Kameras gearbeitet werden. Dies ist zum Beispiel bei der Rekonstruktion von Verkehrssituationen mittels Amateuraufnahmen der Fall. Für solche Anwendungsfälle wurde das Prinzip der „inversen Kamera“ entwickelt, welches aber auch für zahlreiche andere Anwendungsfälle der Photogrammmetrie, gerade auch bei Aufgabenstellungen wie der vorliegenden Pflanzenvermessung, eine deutliche Arbeitserleichterung darstellt. Beim Einsatz des „inverse camera“-Verfahrens muss die äußere Orientierung (Position) der Kamera nicht bekannt sein, und auch die Parameter der inneren Orientierung können, sofern sie noch nicht vorliegen, nachträglich berechnet werden. Sofern derartige Werte bekannt sind, können sie zur Erhöhung der Genauigkeit zusätzlich in den Prozess der inversen Kalibrierung mit einbezogen werden. Somit bietet diese Vorgehensweise dem Messenden weitgehende Freiheit bei der Wahl der Aufnahmeposition. Dies ist insbesondere bei nicht von allen Seiten gleich gut einsehbaren Objekten, wie es gerade bei Bäumen der Fall ist, ein nicht zu unterschätzender Vorteil: Durch die Möglichkeit, vor Ort die Aufnahmeposition den Gegebenheiten entsprechend nach Belieben wählen zu können, können in vielen Fällen „tote Winkel“ bei den Aufnahmen vermieden werden.

Voraussetzung für die Anwendung dieser Methode ist lediglich, dass auf dem Bild eine bestimmte Anzahl von Punkten einsehbar ist, deren räumliche Position bekannt ist. Je besser diese sogenannten signalisierten, häufig auch als Pass- oder Kontrollpunkte bezeichneten Punkte den Raum um das zu vermessende Objekt umschließen, desto höher ist die Genauigkeit bei der Wiederherstellung sowohl der inneren als auch der relativen äußeren Orientierung des jeweiligen Bildes. Genauer wird dieser Vorgang der nachträglichen Kalibrierung in den Abschnitten III.2.1.2.2 und III.3.1.2.3 anhand der konkreten Anwendung bei Silhouettenschnitt und Mehrbildtriangulation beschrieben. Im Wesentlichen handelt es sich dabei wiederum um eine Variante des Triangulationsverfahrens, sozusagen nur „umgekehrt“. Da bei dieser Vorgehensweise photogrammmetrische Orientierung und photogrammmetrische Punktbestimmung verschmelzen, spricht KRAUS (1996, S. 467) von einer sogenannten Selbstkalibrierung.

2.2.6.2 Eignung der Photogrammmetrie für die Pflanzenvermessung

In den folgenden Absätzen werden etliche photogrammmetrische Verfahren zur räumlichen Objektvermessung vorgestellt. Neben den jeweils verfahrensspezifischen Vorzügen und Einschränkungen sollen einleitend zunächst einmal die allen Verfahren gemeinsamen, grundsätzlichen Vor- und Nachteile der Fotoauswertung aufgeführt werden, insbesondere im Hinblick auf die Eignung für die Vermessung von Pflanzen.

Prinzipiell sind, wie bei allen optischen Verfahren, natürlich nur die sichtbaren Objektbestandteile erfassbar. Dies ist gerade bei Pflanzen sicherlich ein deutlicher Nachteil, welcher allerdings bei vielen photogrammmetrischen Lösungen durch die Option, aus geeigneten, frei wählbaren Kamerapositionen Aufnahmen zu machen, ausreichend kompensiert werden kann. Daher sind diese Probleme insbesondere bei konkaven und konvexen Objektbestandteilen (Blätter!) relevant, müssen aber auch bei allen anderen Messaufgaben berücksichtigt werden. Laubhölzer im Sommerzustand stellen hier eine besondere Herausforderung für das Verfahren dar.

Der grundsätzliche Vorteil der Photogrammmetrie besteht in der absoluten Zerstörungsfreiheit des Messverfahrens. Die Erfassung erfolgt vollständig kontaktlos, alleine durch das Fotografieren. Insbesondere besteht oft die Möglichkeit, lediglich diese Fotoaufnahmen direkt am Objekt vornehmen

zu müssen. Die Feldarbeit kann so meist kurz gehalten werden, die zeitaufwändigeren Auswerteschritte erfolgen erst später am Computer oder an einem ähnlichen photogrammmetrischen System. Somit ist auch darüber hinaus eine schnelle erste Archivierung des aktuellen Zustandes möglich, die konkrete Auswertung kann erst bei Bedarf erfolgen. Zudem können, da die Fotos vorliegen, auch nachträgliche Kontroll- und Ergänzungsmessungen am unveränderten Ausgangsmaterial vorgenommen werden. Die Messungen sind somit anhand der Aufnahmen jederzeit reproduzierbar.

Als Kamera scheint, trotz der beschriebenen Genauigkeitsvorteile beim Einsatz eines analogen Gerätes, der Einsatz einer hochwertigen Digitalkamera angebracht. Die erhöhte Genauigkeit der Analogtechnik bewegt sich in einem Bereich, welcher bei der Vermessung von heterogenen Objekten wie Bäumen ohnehin bei weitem nicht ausgereizt wird, beziehungsweise auch überhaupt nicht ausgereizt werden kann. Potentielle Genauigkeiten im Bereich von weit unter einem Millimeter sind bei diesen komplexen Messobjekten ebenso illusorisch wie unnötig. Zudem wäre auch bei Analogtechnik der Einsatz teurer spezieller Messkameras nötig, um eine derartige Exaktheit überhaupt zu erreichen.

Die Vorteile der Digitaltechnik hingegen kommen voll zum Tragen: Ohne Zusatzkosten und Zeitaufwand können zahlreiche Bilder von dem Messobjekt genommen werden, um auch schwierig einsehbare Bestandteile aufnehmen zu können. Eine der wichtigsten Grundlagen vieler photogrammmetrischer Verfahren, nämlich so viele Fotos wie möglich zu machen, aber davon nur wenige ausgewählte zu verwenden (EOS SYSTEMS, 2000, S. 68f), kann so uneingeschränkt eingehalten werden. Die Fotos können außerdem sofort auf den Computer übertragen werden, und, sofern dies im Verfahren vorgesehen ist, direkt automatisiert weiterverarbeitet werden. Aufwändige Zwischenschritte wie Entwickeln und Einscannen entfallen. Die Probleme, welche durch diese Arbeitsschritte auch bei forstlichen Problemstellungen anfallen, können zum Beispiel bei HENDRICH (1997, S. 33ff) nachgelesen werden. Gegebenenfalls ist sogar eine direkte Ansteuerung der Digitalkamera durch die jeweilige Photogrammmetriesoftware möglich. Diese direkte Verbindung hat ihrerseits durchaus auch positive Auswirkungen auf die erreichbare Genauigkeit.

Bezüglich des Einsatzes spezieller Messkameras ist zu sagen, dass durch ausgefeilte Verfahren zur nachträglichen Kalibrierung selbst mit Nicht-Messkameras noch mit einer mehr als ausreichend hohen Genauigkeit zu rechnen ist. Selbst bei der Stereophotogrammmetrie, bei der der Einsatz photogrammmetrischer Spezialkameras normalerweise Pflicht ist, kommt REIDELSTÜRZ (1997, S. 56) zu dem Schluss, dass für den Einsatz im forstlichen Bereich hochwertige, aber ansonsten handelsübliche Fotoapparate vorzuziehen sind.

Zusammenfassend lässt sich somit sagen, dass die Photogrammmetrie grundsätzlich als sehr geeignetes Verfahren für den vorgesehenen Aufgabenbereich anzusehen ist. Insbesondere beim Einsatz einer modernen Digitalkamera ermöglicht die Fotoauswertung eine effektive Arbeitsweise. Dabei muss bei den erforderlichen Genauigkeitsansprüchen auch nicht unbedingt auf teuere, spezielle photogrammmetrische Modelle ausgewichen werden, die Verwendung einer hochwertigen Consumer-Kamera erscheint durchaus den Erfordernissen angemessen. Als Methode zur Kalibrierung bietet sich unter dem Gesichtspunkt der problemloseren Anwendung, da ohnehin keine Messkamera zum Einsatz kommt, die nachträgliche Herstellung von sowohl innerer als auch äußerer Orientierung an. Bei Kenntnis der grundlegenden Zusammenhänge sollte auch mit dieser Methode eine mehr als ausreichende Genauigkeit bei der Vermessung erreichbar sein.

2.2.6.3 Einzelbildauswertung

Verfahrensbeschreibung

Bei der Einzelbildauswertung reicht, wie der Name schon sagt, eine einzige Aufnahme aus, um räumliche Objekte vermessen zu können. Um aus den einzelnen zweidimensionalen Bildkoordinaten Werte aus der dreidimensionalen Wirklichkeit zu erhalten, müssen allerdings zahlreiche Umstände der Bildaufnahme beziehungsweise Eigenschaften des zu vermessenden Objekts von vorneherein bekannt sein (Auflistung zum Beispiel bei KRAUS, 1997, S. 285ff). Es handelt sich bei auf der Einzelbildauswertung basierenden Methoden also eher um Verfahren, die es ermöglichen, Verzerrungen aus den zweidimensionalen Bildern herauszurechnen und somit einfache Messungen an darauf sichtbaren Objekten vornehmen zu können, denn um Werkzeuge zur umfassenden dreidimensionalen Objekterfassung.

Eignung für die Pflanzenvermessung

Für komplexe räumliche Vermessungen, wie im Rahmen der vorliegenden Studie erforderlich, ist die Einzelbildauswertung prinzipiell kaum geeignet. Dennoch gibt es einige Beispiele, bei denen aus einzelnen Bilder forstlich relevante Daten gewonnen werden konnten. Dabei stand allerdings weniger das Vermessen von konkreten 3D-Daten der Bäume im Mittelpunkt. Vielmehr werden hier Verfahren vorgeschlagen, um anhand eines einzelnen zweidimensionalen Fotos einzelne Werte wie Baumhöhe oder Volumen feststellen zu können. So hat bereits WEBER (1900; zitiert nach REIDELSTÜRZ, 1997) ein Einzelbild-Verfahren zur Vermessung von Stichprobenflächen vorgeschlagen. Ein neueres Verfahren mit Einbildmessung zur Erstellung von Sortenmodellen stammt von DEHN (1987). CLARK et al. (2000) nutzten eine Digitalkamera zum Bestimmen von Durchmessern und Höhen stehender Bäume. Somit ist die Einzelbildauswertung zwar für die vorliegende Fragestellung weniger relevant, kann aber in manchen Fällen für forstliche Messaufgaben durchaus von Interesse sein.

2.2.6.4 Stereophotogrammmetrie (Zweibildauswertung)

Verfahrensbeschreibung

Auch dieses Verfahren ist bereits seit längerem eingeführt und wird gerade in der Luftbildauswertung oft verwendet, ist aber ebenfalls für Nahbereichsvermessungen, auch im forstlichen Bereich, gut einsetzbar (PRATSCH, 1991; REIDELSTÜRZ, 1997). Das Prinzip der Stereobildauswertung beruht auf dem selben Verfahren, wie auch das menschliche Gehirn aus zwei Bildern (von beiden Augen) ein dreidimensionales Abbild formt. Zur Stereoauswertung müssen also zwei Bilder des zu vermessenden Objekts aufgenommen werden, wobei der Abstand der beiden Aufnahmeorte - der sogenannte Basisabstand - im Gegensatz zu den diesbezüglichen Grundsätzen bei der im folgenden Abschnitt beschriebenen Mehrbildtriangulation eher gering sein sollte. Die Aufnahmerichtungen müssen insbesondere normal zur Basis und zueinander parallel sein, eine Bildüberdeckung von 60% ist dabei anzustreben (KRAUS, 1997, S. 24ff und S. 114ff).

Die derartig erzeugten Doppelbilder können - technisch relativ einfach realisierbar - mittels optischer Geräte (Linsen- und Spiegelstereoskope) dreidimensional betrachtet werden. Um neben dem bloßen räumlichen Betrachten auch konkrete Messwerte erfassen zu können, sind allerdings kom-

plexere Gerätschaften, die sogenannten Stereoplotter, nötig. Preislich bewegen sich diese in einer Spanne von mehreren zehn- bis mehreren hunderttausend EUR. Die ursprünglichen analogen Auswertegeräte sind heutzutage kaum mehr gebräuchlich, Standard sind rechnergesteuerte analytische und in zunehmenden Maße digitale Auswertegeräte. Letztere sind unter anderem dadurch gekennzeichnet, dass die Stereobilder über einen Computermonitor mittels „Shutterbrille“ pseudo-dreidimensional dargestellt werden können. Hier können die gewünschten dreidimensionalen Daten direkt am Computer abgelesen und weiterverarbeitet werden.

Zur Anwendung der Stereoauswertung ist natürlich ein geschultes Wahrnehmungsvermögen für die dreidimensionalen Bilder nötig. Nicht jeder hat die Fähigkeit, diese exakt genug für Messaufgaben wahrzunehmen. Durch den Einsatz moderner Stereobildauswerteverfahren wird zumindest dieser Punkt vereinfacht.

Eignung für die Pflanzenvermessung

Bezüglich des Einsatzes der Stereophotogrammmetrie in forstlichen Anwendungsbereichen kann man auf die Erfahrungen, die REIDELSTÜRZ (1997; siehe auch KOCH und REIDELSTÜRZ, 1998b) in seinen Untersuchungen gemacht hat, verweisen. In den genannten Studien werden ausführlich die Einsatzmöglichkeiten der terrestrischen Stereophotogrammmetrie in der Forstwirtschaft diskutiert. Dazu zählen, neben anderen Einsatzmöglichkeiten, nicht nur Messungen von einzelnen Solitärbäumen, sondern auch komplette Probekreisaufnahmen. Verschiedene Kronen- und Schaftparameter konnten so an gut einsehbaren Bäumen in Form eines 3D-Modells zerstörungsfrei photogrammmetrisch aufgenommen werden. Die erreichbare Genauigkeit war dabei recht hoch, bei einem Objekt vom 30 Zentimetern Durchmesser konnten beispielsweise bei einer Aufnahmeentfernung von drei Metern absolute Genauigkeiten von 0,028 Zentimetern erreicht werden (KOCH und REIDELSTÜRZ, 1998a). Die Untersuchungen beschränkten sich allerdings weitgehend auf eine reine Erfassung und Visualisierung der Daten, weniger auf die zugehörige Auswertung.

Weiterhin sind die am Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung der Technischen Universität München durchgeführten Untersuchungen von PRATSCH (1991) zu nennen, welcher mit einem handelsüblichen Stereoauswertegerät ebenfalls Schaft- und Kronenmessungen vornahm. Erfasst wurden Kronenform, Baumhöhe und BHD, sowohl am Einzelbaum als auch im Bestand, bis hin zur kompletten Einmessung von Probekreisen.

Es ist bei stereoskopischer Vermessung allerdings zu beachten, dass nur zwei Aufnahmen vom Messobjekt, gerade bei Pflanzen, in den meisten Fällen keinen Rundum-Überblick über deren komplexe Struktur geben können. REIDELSTÜRZ (1997) konnte dieses Problem zwar durch die Verwendung mehrerer Bildpaare und Verschneiden derselben mittels Bündelblockausgleichs über gemeinsame Passpunkte mindern. Allerdings wurden hier deutliche Messfehler bei der Messung einander entsprechender Objektbestandteile in unterschiedlichen Paaren dieser Stereobilder festgestellt. Somit ist beim Zusammenfügen von Messungen aus unterschiedlichen Bilderpaaren ein und desselben Messprojektes mit Ungenauigkeiten zu rechnen, zudem handelt es sich dabei um einen sehr aufwändigen Vorgang.

Weiterhin ist die Aufnahmeanordnung relativ komplex, da mit zwei Kameras gearbeitet wird, die in einem gegebenen Basisabstand positioniert werden müssen. Dabei muss ein geeigneter Kompromiss aus hoher Genauigkeit (großes Basisverhältnis) und guter Objekteinsicht (kleines Basisverhältnis) gefunden werden. Vor Beginn eines Messprojektes müssen hierfür situationsabhängig die geeigneten Parameter bestimmt werden. Nur wenn diese Rahmenbedingungen für die terrestrische Aufnah-

me gemäß den von REIDELSTÜRZ (1997, S. 57ff) angefertigten Modellen korrekt hergestellt wurden, lassen sich hohe Genauigkeiten erreichen. Gleiches gilt für die jeweiligen Kameraeinstellungen und das Einmessen der notwendigen Passpunkte am Messort. Hierfür müssen gemäß den beschriebenen Untersuchungen 200 - 450 Minuten angesetzt werden

Für die Auswertung sind zudem teure photogrammmetrische Systeme notwendig. Der von REIDELSTÜRZ (1997, S. 229ff) verwendete analytische Stereoplotter alleine kostete 350.000 DEM, dazu kommen unter anderem Messkameras im Wert von mehreren zehntausend DEM und weitere Vermessungsgeräte für die notwendigen Einmessarbeiten (Theodolit etc.).

2.2.6.5 Mehrbildauswertung (photogrammmetrische Triangulation)

Verfahrensbeschreibung

Die photogrammmetrische Mehrbildauswertung beruht, wie viele andere Verfahren zur räumlichen Punktbestimmung, auf einfachen geometrischen Gesetzmäßigkeiten. Die wichtigste davon ist die Triangulation, welche schon bei der Beschreibung von Schall- und Magnetfeldmessverfahren sowie der „inverse camera"-Kalibrierung als grundlegendes Prinzip aufgeführt wurde. Deswegen sollen zum Verständnis der Mehrbildauswertung einleitend anhand von Abbildung 7 kurz die Grundgedanken dieser geometrischen Methodik dargestellt werden. In der praktischen Anwendung sind noch einige Aspekte mehr zu beachten.

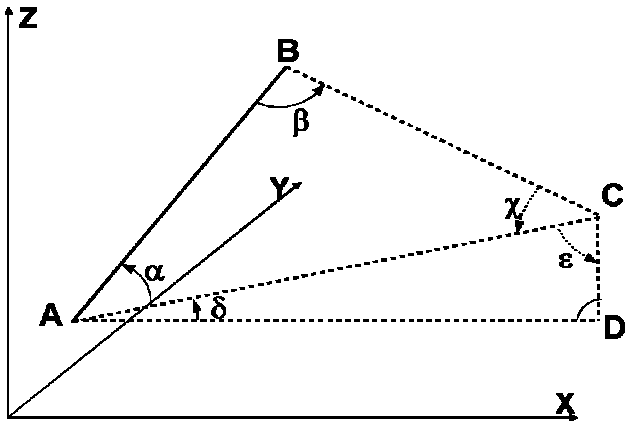

Abbildung 7: Grundprinzipien der Triangulation. Bekannte Größen sind durchgezogen, zu errechnende gepunktet dargestellt.

Gemessen werden soll beispielsweise der Punkt C. Bekannt sind zum einen die Punkte A und B - im Falle der Mehrbildtriangulation wären dies zwei Kamerastandorte (beziehungsweise bei der Schallfeldmessung die Schallemitter, bei der Magnetfeldmessung die Magnetfeldgeneratoren). Ebenso ist folglich die Länge der Strecke $\overline{AB}$ bekannt. Die Winkel α und β sind als Drehwinkel der Kamera aufgrund deren bekannten Ausrichtung bekannte Größen. Deswegen ist auch der Winkel δ (Neigung der Kamera) ebenso bekannt wie der entsprechende Winkel am Kamerastandort B - dieser ist in Abbildung 7 aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht abgebildet. Da die Summe der Winkel im Dreieck 180° ergeben muss, sind die Winkel am Messpunkt (χ und ε) ebenfalls problemlos zu bestimmen. Noch fehlende Werte zur Positionsbestimmung von C, wie die Strecken $\overline{AD}$, $\overline{AC}$, $\overline{BC}$ oder $\overline{DC}$, können mit gängigen geometrischen Standardformeln zur Dreiecks-

berechnung ermittelt werden (siehe hierzu die entsprechenden Abschnitte in gängigen Formelsammlungen, wie bei zum Beispiel bei STÖCKER, 1995, S. 82ff).

Nach diesem oder verwandten Prinzipien arbeiten, wie bereits erwähnt, zahlreiche Verfahren der räumlichen Punktbestimmung. Auf die Ausführungen von KRAUS (1996, S. 46ff) zur Bündeltriangulation sei an dieser Stelle verwiesen, für den konkreten Fall der Mehrbildtriangulation ist die Anwendung in Abbildung 8 konkret dargestellt. Natürlich ist die Situation in der photogrammmetrischen Praxis deutlich komplexer. Insbesondere ist, wie in Abschnitt II.2.2.6.1 erklärt, auch der Strahlengang im Kamerainneren in die Berechnungen mit einzubeziehen: So berechnen sich zum Beispiel die Winkel α und δ für den Kamerastandort A aus Abbildung 7 nicht nur aus Neigung und Azimut des Fotoapparates, sondern es müssen unter anderem die zweidimensionalen Bildkoordinaten ξ und η (vergleiche Abbildung 4) unter Beachtung der Kameraparameter in die Berechnung einbezogen werden.

Aus Sichtweise des Endanwenders lässt sich die photogrammmetrische Mehrbildtriangulation relativ einfach beschreiben: Von dem zu vermessenden Objekt werden mindestens zwei - je mehr, desto besser - Bilder aus unterschiedlichen Perspektiven gemacht. In Abbildung 8 sind die Kamerapositionen als O_1 und O_2 bezeichnet. Von diesen Kamerastandorten sind nicht nur die räumlichen Koordinaten $x_{1/2}$,$y_{1/2}$ und $z_{1/2}$ bekannt, sondern auch die jeweilige Aufnahmerichtung (Neigung und Azimut des Fotoapparates). Zusätzlich müssen die Kennwerte der inneren Orientierung zur Gewinnung der nötigen Ausgangsdaten für die Triangulation bekannt sein. Auf diese Art und Weise können die dreidimensionalen Koordinaten x,y und z eines jeden Objektpunktes P, sofern dieser auf mehr als einem Bild zu erkennen ist, bestimmt werden.

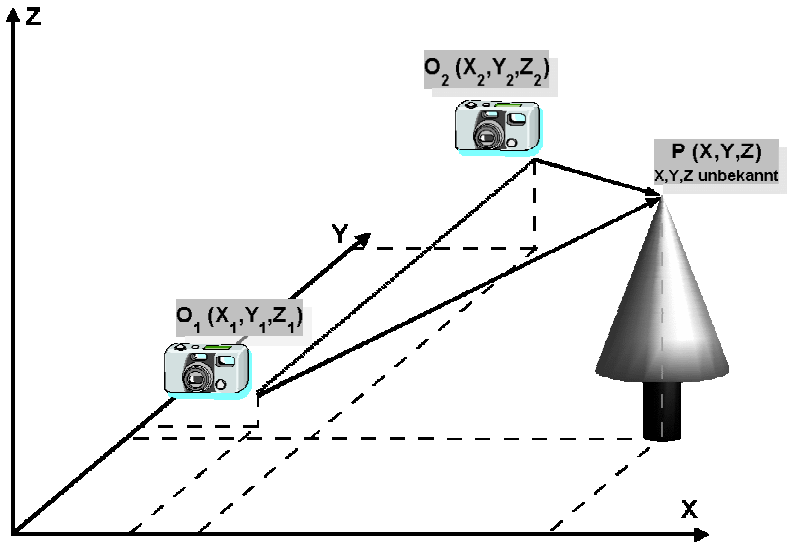

Abbildung 8: Prinzip der photogrammmetrischen Punktbestimmung mittels Mehrbildtriangulation am Beispiel einer Messung mit nur zwei Aufnahmepositionen.

Der bestimmende Faktor für die Genauigkeit der Triangulation ist, neben der Erkennbarkeit und Markierungsgenauigkeit des Punktes auf den einzelnen 2D-Bildern, der Winkel zwischen den Aufnahmestandorten. Je näher dieser Winkel an 90° liegt, desto genauere Ergebnisse sind zu erwarten (EOS SYSTEMS, 2000, S. 62f; HENDRICH, 1997, S. 94). Bei kleineren Winkeln hingegen wirken sich die unvermeidlichen Ungenauigkeiten immer deutlicher auf das Ergebnis aus. Sind auf den Bildern auch Fixpunkte mit bekannten absoluten Koordinaten vorhanden, so dass das vermessene Objekt in

ein übergeordnetes Koordinatensystem eingepasst werden kann, kann zudem eine absolute äußerer Orientierung vorgenommen werden.

Somit müssen auch bei diesem Verfahren die zu vermessenden Punkte per Hand gekennzeichnet werden, und zwar jeder einzelne Punkt in möglichst vielen Bildern zugleich. Dabei kann die Identifizierung einander entsprechender Punkte in unterschiedlichen Bildern, gerade bei unregelmäßig geformten Objekten, ein erhebliches Problem darstellen. Hier bietet das Prinzip der Mehrbildauswertung mit den sogenannten Epipolaren ein praktisches Hilfsmittel, welches auch von den gängigen Softwarepaketen genützt wird: Als Vorbedingung müssen bereits mehrere Punkte in verschiedenen Bildern zueinander referenziert worden sein. Bei weiteren Punkten kann dann, sobald diese auf einer Aufnahme gekennzeichnet worden sind, für die anderen Bilder zumindest eine Hilfslinie (Epipolare) angegeben werden, auf der diese Punkte unter Berücksichtigung der bislang kalkulierten räumlichen Daten mit hoher Wahrscheinlichkeit liegen. Aktuelle Photogrammmetriesoftware geht noch weiter und kann ab einem gewissen Erkenntnisstand über die räumliche Situation, welche durch die zweidimensionalen Bilder eines Messprojektes repräsentiert wird, die Referenzierung fast automatisch übernehmen.

Für derartige photogrammmetrische Auswertungen existieren am Markt diverse Lösungen. Je nach Ausbaustufe bieten diese Softwarepakete weitere Spezialfunktionen, um die mühsame Handarbeit beim Referenzieren von Punkten zu erleichtern. *CDW* (Close Range Digital Workstation, Preis allein der Software je nach Ausbaustufe ab 8.000 EUR), ein Produkt der Firmen *AICON* / *Rollei* (Internet: [17] und [18]), erlaubt zum Beispiel das automatische Referenzieren von Bildern anhand von speziellen Punktmarkierungen, die an dem zu vermessenden Objekt angebracht werden. Gerade bei industriellen Anwendungen stellt dies eine enorme Arbeitseinsparung dar, welche jedoch bei komplex geformten natürlichen Objekten meist nicht einsetzbar ist. Produkte, welche auf derartige, für den gegebenen Anwendungsfall ohnehin nicht brauchbare Sonderfunktionen verzichten, sind bereits zu deutlich günstigeren Preisen zu haben, so beispielsweise die in Abschnitt III.3.1.2.2 beschriebene Software *Photomodeler Pro* (Internet: [8]) für etwa 1.500 EUR.

Eignung für die Pflanzenvermessung

Der Einsatz der Mehrbildtriangulation ist, ebenso wie die Stereophotogrammmetrie, in forstlichen Anwendungsbereichen nicht vollkommen unbekannt: So wurde ein verwandtes Verfahren von HENGL et al. (1997) als theoretische Lösung für verschiedene forstliche Messproblemstellungen vorgeschlagen. Hierzu wurde um den zu vermessenden Baum ein Gestell mit bekannten Abmessungen zur relativen äußeren Orientierung gestellt. Mindestens sechs bekannte Koordinaten sind für dieses Verfahren als Kontrollpunkte notwendig. Nachdem diese bekannten Punkte auf mehreren Bildern referenziert worden sind, können weitere am Baum zu vermessende Punkte mittels des oben beschriebenen Epipolaren-Prinzips relativ einfach bestimmt werden. Das für diesen Zweck in der Pascal-ähnlichen Programmiersprache *Delphi* entwickelte Programm *STABLO3D* („Stablo“ ist die kroatische Vokabel für „Baum“) ermöglicht auch den Vergleich mit konventionell gemessenen Daten. Es erwies sich, dass solcherart Genauigkeiten im Zentimeterbereich erreicht werden können. Messziel war hierbei vor allem die Erfassung des Baumschaftes, um schon vor der Holzernte zerstörungsfrei die einzelnen Abschnitte vermessen zu können. Weitergehende Analysen zur Struktur des Baumes erfolgten darüber hinaus allerdings nicht.

Weiterhin sind an dieser Stelle die Untersuchungen zu nennen, die HENDRICH (1997) zur Vermessung von Kronenstrukturen angestellt hat. Zum Einsatz kam dabei eine handelsübliche, allerdings nachträglich kalibrierte analoge Kamera in Verbindung mit einer eigens für diesen Anwendungsfall ent-

wickelten Photogrammmetriesoftware. Dabei erwies sich das Verfahren im praktischen Einsatz bei der Vermessung einer Fichtenkrone zwar als grundsätzlich anwendbar, als äußerst problematisch stellte sich allerdings insbesondere die korrekte Zuordnung der homologen Punkte heraus. Ohne die Verwendung künstlicher signalisierter Punkte wäre daher die Vermessung einiger Parameter der komplexen Baumkrone einer Fichte im Rahmen des zitierten Projektes nicht gelungen.

Die Mehrbildtriangulation hat sich somit zumindest als prinzipiell gangbares Verfahren zur Erhebung auch von Baumdaten im forstlichen Bereich erwiesen. Allerdings ist bei besonders komplexen Objekten mit großen Schwierigkeiten zu rechen, daher mussten sich zum Beispiel die Untersuchungen von HENGL et al. (1997) auf wenige, aber in der forstlichen Praxis (Holzernte und Rundholzsortierung) relevante Kennwerte beschränken. Will man detailliertere Messungen anstellen, treten hingegen deutliche Probleme auf. Es ist allerdings zu bedenken, dass es sich bei den beschriebenen Projekten um Untersuchungen an großen Bäumen handelt. Das vorliegende Projekt hat sich jedoch die Vermessung von jungen Baumpflanzen zum Ziel gesetzt. Da diese übersichtlichere Strukturen aufweisen, erscheinen Messversuche mit Mehrbildauswertung in diesem Fall als durchaus praktikable Alternative für eine umfassende Architekturvermessung.

2.2.6.6 Volumen- beziehungsweise Silhouettenschnitt

Verfahrensbeschreibung

Dieses Verfahren der Photogrammmetrie weicht insofern von den vorangehend beschriebenen Methoden ab, als hier nicht nur einzelne, jeweils händisch zu markierende Punkte am Objekt vermessen werden, sondern ein vollständiges Volumenmodell des zu erfassenden Objektes am Ende des Scanprozesses steht. Im Gegensatz dazu können mit den bislang beschriebenen Verfahren nur aus Einzelpunkten zusammengesetzte Strukturdaten erfasst werden.

Beim Volumenschnitt (in Anlehnung an die englische Bezeichnung „silhouette cut“ auch unter der Bezeichnung Silhouettenschnitt bekannt) wird das zu vermessende Objekt, wie Abbildung 9 zu entnehmen, vor einem Hintergrund in einer einheitlichen Farbe auf einen Drehteller platziert. Die zuvor kalibrierte Kamera - der Kalibrierungsprozess ist hier aufgrund der gleichbleibenden Positionierung der Kamera zum Objekt weitgehend automatisierbar - macht in einer beliebigen Anzahl von bekannten Drehwinkeln Aufnahmen des Objektes. Mittels der entsprechenden Software kann anschließend der in einer definierten Farbe gehaltene Hintergrund durch Chroma-Keying[11] herausgerechnet werden, so dass zu jeder Aufnahme die Silhouette des Objekts aus einem bestimmten Aufnahmewinkel verfügbar ist (NIEM und STEINMETZ, 1996).

11 Beim „Chroma-Keying“ werden alle Farbtöne, welche einer vom Benutzer vorgegebenen Farbe ähneln, nach verschiedenen Verfahren identifiziert und, in diesem Fall, als für die Weiterverarbeitung störender Hintergrund herausgerechnet.

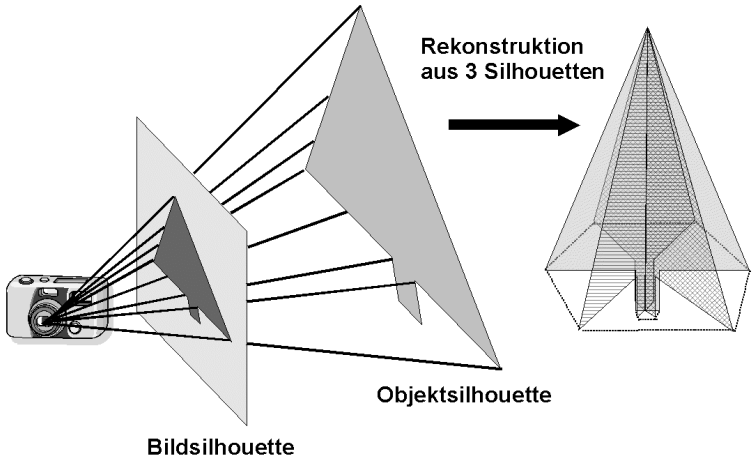

Abbildung 9: Schematische Funktionsweise der dreidimensionalen Objekterfassung aus mehreren (hier beispielhaft lediglich drei) Silhouettenbildern.

Da die Kameraposition bekannt ist und sich nicht ändert, kann anhand des ebenfalls bekannten Anstellwinkels des Drehtellers die relative Positionierung Fotoapparat-Objekt zueinander für jedes Bild, und somit auch jede zugehörige Silhouette, berechnet werden. Aus den Silhouetten kann dann ein dreidimensionaler Körper zusammengesetzt werden (NIEM, 1994; NIEM und BUSCHMANN, 1994; NIEM und WINGBERMÜHLE, 1997). Die dreidimensionalen Daten zwischen den einzelnen Anstellwinkeln (beziehungsweise den daraus resultierenden Silhouettenbildern) werden aus den vorhandenen Messdaten interpoliert. Aus diesem Sachverhalt geht hervor, dass die Anzahl der Aufnahmen direkten Einfluss auf die erreichte Messgenauigkeit hat: Je mehr tatsächliche Silhouettenmessungen, desto weniger Daten müssen durch Interpolation berechnet werden. Dass zudem durch eine höhere Zahl von Aufnahmen auch ein besserer Einblick in die teilweise sehr komplexe Pflanzenstruktur möglich ist, versteht sich von selbst.

Kombiniert man die errechneten dreidimensionalen Daten zusätzlich noch mit den in den unbearbeiteten Fotografien enthaltenen Farbinformationen, ist es weiterhin möglich, das Objekt mit Texturen zu versehen (NIEM und BROSZIO, 1995). Auf diese Art und Weise kann das Aussehen der Objektoberfläche in ein Messprojekt mit einbezogen werden.

Zusätzlich zu den bereits genannten Literaturquellen gibt es zahlreiche weitere physikalische Abhandlungen zu diesem Thema. Insbesondere sind weitere Unterlagen auch über die Internetseiten des Institutes für Theoretische Nachrichtentechnik und Informationsverarbeitung der Universität Hannover (Internet-URL: [4]) abrufbar.

Die Preisspanne für die Anschaffung derartiger Geräte reicht von mehreren 1.000 bis hin zu 15.000 EUR bei höchsten Genauigkeitsanforderungen.

Eignung für die Vermessung von Pflanzen

Mit dem Volumenschnitt erhält man unter optimalen Bedingungen ein vollständiges räumliches Abbild des gesamten Messobjektes. Es wird der gesamte Körper erfasst, nicht nur einzelne Strukturdaten. Durch die direkte Verfügbarkeit von kompletten Volumendaten ist der Schritt zur Biomasseschätzung nicht weit. Sogar eine weitergehende Erfassung von Oberflächendaten inklusive Farbin-

formationen ist denkbar. Dabei ist das Verfahren vollständig automatisierbar, in vorliegenden Implementationen allerdings meist nur für bewegliche Objekte, und erfolgt vollständig zerstörungsfrei.

Für die Pflanzenvermessung wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes ein von der Firma *Dimension3D* (Internet-Adresse: [7]) kommerziell vertriebenes 3D-Scansystem getestet, welches direkt auf den vorangehend angeführten Grundlagenstudien beruht. Abbildung 10 zeigt das Ergebnis der ersten Probemessung, welche in Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma, aber ohne weitere Optimierungen für das spezielle Anwendungsfeld, durchgeführt wurde. Auf dem Volumenbild sieht man acht etwa 30 cm große, getopfte Buchenpflanzen (sowohl im belaubten als auch unbelaubten Zustand), welche mit der stationären Ausführung des Messsystems innerhalb von etwa 15 Minuten räumlich erfasst werden konnten.

Wie man in der Abbildung erkennen kann, handelt es sich dabei allerdings zunächst noch um 3D-Rohdaten, also um eine reine Darstellung der 3D-Punkte, welche den vom Objekt besetzten Raum umschließen. Ebenfalls ist noch keine Information zur Skalierung verfügbar, Messungen sind in dieser Form also noch nicht möglich. Bereits so erweist sich das Computerabbild als sehr realitätsnah. Selbst die Tatsache, dass mehrere Pflanzen auf engem Raum nebeneinander gleichzeitig vermessen werden mussten, überfordert die Methodik scheinbar nicht. Aufgrund des offensichtlichen Potentials des Silhouettenschnittes als räumliches Messverfahren erscheint diese Methode auch als ein sehr vielversprechender Ansatz für die Vermessung von Baumpflanzen, insbesondere sofern diese getopft sind.

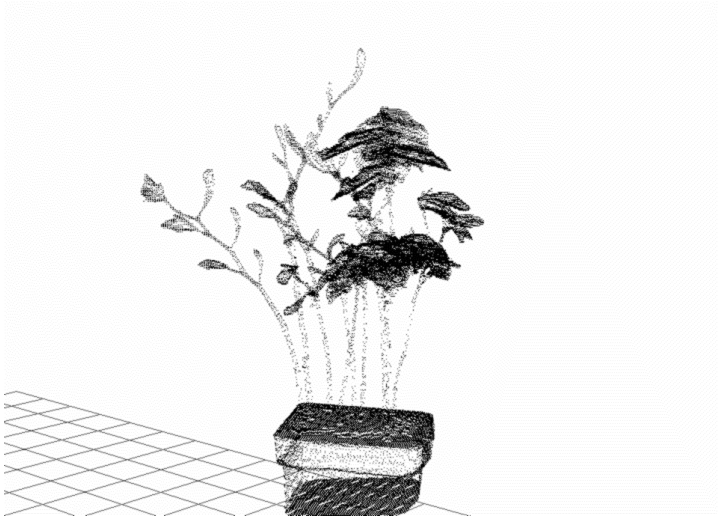

Abbildung 10: Ergebnis der Testerfassung mit der *ScanStation*

3 Ergebnisse der Evaluierung

Im Folgenden sollen zum Abschluss des ersten Teilaspektes der vorliegenden Studie die vorangehend besprochenen Verfahren noch einmal gegenübergestellt sowie die Schlussfolgerungen für die weitere Vorgehensweise vorgestellt werden. Tabelle 4 gibt dazu zunächst einen Überblick, anschließend werden die einzelnen Gesichtspunkte detailliert erläutert. Die vorgenommene Bewertung der

jeweiligen Qualitäten mit den Abstufungen von „++“ bis „--“ ist selbstverständlich noch sehr undifferenziert und kann nur für eine erste grobe Einstufung dienen.

Tabelle 4: Beurteilung der 3D-Messverfahren gemäß dem Lastenheft. Die Spalten der beiden favorisierten Verfahren sind grau hinterlegt dargestellt.
Beschreibung der Spalten: (1) Händische Vermessung; (2) Magnetfeldmessung; (3) Schallfeldmessung; (4) aktive optische Verfahren; (5) Einzelbildauswertung; (6) Stereophotogrammmetrie; (7) Mehrbildauswertung; (8) Silhouettenschnitt; (9) Tomographie.
Bewertungsschlüssel für die Erfüllung der einzelnen Kriterien: ++ hervorragend; + gut; o mäßig; - mit Einschränkungen; -- nicht erfüllt.

Kriterium	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)
Verdeckte und sich überschneidende Objektbestandteile	o	o	o	-	--	-	+	o	++
Kontaktlosigkeit	--	-	-	++	++	++	++	++	++
Mobilität	++	o	o	+	++	o	++	--	--
Freilandeinsatz	++	+	+	o	-	-	-	--	--
Datenqualität	--	o	-	++	-	+	+	+	++
Eignung für Strukturdaten	+	+	+	+	+	+	++	o	o
Eignung für Körperdaten	--	--	--	+	--	--	-	++	++
Kosten	++	o	o	--	++	--	++	o	--
Erprobt bei Pflanzenvermessung	++	++	++	--	+	++	++	--	o
Zeit	--	o	o	++	o	o	+	++	++

Gemäß der Aufgliederung in Kapitel II.1.3 ist eines der wichtigsten Kriterien für die Tauglichkeit eines Verfahrens die Fähigkeit, die Komplexität einer Baumpflanze exakt zu erfassen. Während die Prämisse der Kontaktlosigkeit von allen optischen und tomographischen Verfahren prinzipiell vollständig erfüllt wird, ermöglichen nur letztere Variante dabei noch eine absolut problemlose Erfassung auch von Überschneidungen und Verdeckungen. Einige photogrammmetrische Verfahren (Mehrbildtriangulation und Silhouettenschnitt) werden allerdings dieser Problematik durch die Tatsache gerecht, dass eine größere Anzahl von Fotos von verschiedenen, benutzerdefinierten Standorten aus aufgenommen werden können. Bei Einzelbildauswertung und Stereofotografie ist dies allerdings nicht möglich. Auch bei den manuellen Verfahren ist teilweise die Erfassung von problematischen Strukturen einfacher möglich als bei den technisierteren Varianten.

Wichtig für den Feldeinsatz ist zudem die Portabilität der Messgerätschaften. Bei der manuellen Vermessung ist diese natürlich voll gegeben, Magnet- und Schallfeldmesstechniken erfordern bereits mehr Aufwand, sind aber nicht prinzipiell ortsgebunden. Die photogrammmetrischen Verfahren haben hier deutliche Vorteile. Einzel- und Mehrbildauswertung erfordern dabei nur den Transport des Fotoapparates und der zur Kalibrierung notwendigen Gegenstände, bei der Stereophotogrammmetrie sind zwei Kameras und entsprechende Gestelle zusätzlich nötig. Die betrachteten Verfahren zum Silhouettenschnitt sind zwar prinzipiell auch portabel, in den aktuell verfügbaren Konstellationen jedoch durch den Einsatz eines Drehtellers oder ähnlicher Hilfsmittel eher als stationäre Lösungen anzusehen. Ebenso sind tomographische Geräte in der Regel nicht transportabel. Mit den inhomogenen Bedingungen beim Freilandeinsatz, insbesondere dem Hintergrund, haben hingegen gerade die optischen, insbesondere die photogrammmetrischen Verfahren ihre Probleme, hier muss für einen homogenen Hintergrund gesorgt werden. Andere Verfahren sind in diesem Aspekt toleranter. Bei der Tomographie stellt sich die Frage nach dem Freilandeinsatz weniger, allerdings wären hier geringere Probleme zu erwarten.

Bezüglich der Datenqualität (Genauigkeit) schneiden Tomographie und Laserscanner am besten ab, die Genauigkeit bewegt sich hier in einem Bereich, der weit über dem liegt, was für die gegebene Aufgabenstellung sinnvoll ist. Die photogrammmetrischen Verfahren sollten ebenfalls die hohe Genauigkeit, welche sie im industriellen Bereich erreichen, auch bei der Pflanzenvermessung zur Geltung bringen können. Die Einzelbildauswertung, welche eher als Entzerrmethode für zweidimensionale Bilder gedacht ist, hat hier naturgemäß Schwächen. Alle Verfahren, die eine manuelle Datenerhebung direkt am Objekt erfordern, erreichen allein schon durch Bedienungenauigkeiten keine sonderlich hohen, aber dennoch meist immer noch ausreichenden Genauigkeiten. Nur Tomographie, aktive optische Verfahren und Silhouettenschnitt erfassen direkt Körperdaten, Strukturdaten müssen nachträglich aus diesen berechnet werden. Alle anderen Verfahren sind mehr auf die Erfassung struktureller Daten hin ausgelegt.

Wichtiger Betrachtungspunkt im Hinblick auf den praktischen Einsatz sind auch die nötigen Kosten, wobei die händische Messung hierbei am günstigsten wegkommt. Die tomographischen Methoden hingegen markieren die preisliche Obergrenze bezüglich Anschaffungspreis und laufender Kosten, aber auch typische Laserscanner-Systeme kosten mehrere 10.000 EUR. Im mittleren Preisniveau liegen Magnet- und Schallfeldverfahren mit Anschaffungskosten zwischen typischerweise 5.000 und 15.000 EUR. Für die Stereophotogrammmetrie sind sehr kostspielige Stereoplotter zur Auswertung nötig (in der Regel über 100.000 EUR), für den Silhouettenschnitt macht der Drehteller einen Großteil der Kosten aus, die dadurch in der selben Größenordnung wie bei den Magnet- und Schallfeldmessverfahren liegen. Bei anderen photogrammmetrischen Verfahren fallen hingegen, sofern auf teuere, professionelle Messkameras verzichtet wird, alleine die Kosten für einen Fotoapparat und die teilweise relativ preisgünstig erhältliche Auswertesoftware an.

Nachdem sich vielversprechende Verfahren wie das Scannen mit Lasergeräten bereits in Vorversuchen als zwar prinzipiell geeignet, aber mit dem komplexen Messobjekt überfordert erwiesen haben, sind insbesondere die beiden photogrammmetrischen Verfahren des Volumenschnitts und der Mehrbildtriangulation als vielversprechende Verfahren für die gegebene Problemstellung zu beurteilen. Der Silhouettenschnitt ist dabei als die Alternative für getopfte Pflanzen zu sehen, welche aber dafür vollständig automatisiert, inklusive Volumeninformationen, eingelesen werden können. Die Mehrbildtriangulation hingegen liefert zwar nur Strukturdaten, ist jedoch als einfaches und effektives Verfahren zu beurteilen, welches auch dem mobilen Einsatz gewachsen ist. Daher sollen im folgenden Kapitel angewandte Lösungsansätze zur Vermessung von Baumpflanzen unter Rückgriff auf diese beiden Verfahren vorgestellt werden.

4 Diskussion der Evaluierung

Im vorangegangen Kapitel wurden zahlreiche Methoden, welche als prinzipiell geeignet für eine räumliche Erfassung von Baumdaten anzusehen sind, vorgestellt und evaluiert. Diese Vorgehensweise war erforderlich, weil die wenigen bislang durchgeführten Untersuchungen zu dieser Thematik keinem umfassenden Vergleich der unterschiedlichen Messoptionen beinhalten. Die Beurteilungskriterien, nach denen diese Verfahren im Hinblick auf den vorgesehenen Anwendungsbereich evaluiert werden sollten, wurden zu diesem Zweck in Form eines Lastenheftes zusammengefasst. Aufgrund der vielfältigen Verfahrensweisen zur räumlichen Datenerfassung einerseits und der komplexen Messziele andererseits kann ein derartiges Lastenheft zwangsläufig nicht alle Aspekte jedes einzelnen Verfahrens abdecken. Die verwendete Einteilung beschränkt sich daher auf relativ weni-

ge, aber gut greifbare Beurteilungskriterien, welche genau auf den angestrebten Einsatzbereich zugeschnitten sind. Dabei wurden praxisnahe Aspekte wie die Verfügbarkeit ausgereifter Messverfahren unter besonderer Berücksichtigung der finanziellen Aspekte höher bewertet als beispielsweise das theoretische Potential bestimmter Verfahren. Auch weitergehende Messmöglichkeiten einzelner Methoden konnten nur in beschränktem Umfang berücksichtigt werden.

Die Evaluierung wurde weitgehend anhand einer Markt- beziehungsweise Literaturstudie durchgeführt, ergänzt durch praktische Untersuchungen bestimmter Verfahren. Es ist zu bedenken, dass dieser Überblick bei der großen Anzahl von am Markt verfügbaren räumlichen Messverfahren zwangsläufig nicht alle Methoden und insbesondere Implementierungen abdecken kann. Eine gewisse Vorauswahl war dabei zu treffen, wobei insbesondere bei den praktischen Untersuchungen konkreter Gerätschaften auch die Bereitschaft des jeweiligen Herstellers, diese für den gegebenen Einsatzzweck zu testen, eine wesentliche Rolle spielte. Zudem ist die vorgestellte Palette an Messverfahren nur als aktuelle Momentaufnahme zu betrachten. Durch die Dynamik und Weiterentwicklung gerade im 3D-Bereich unterliegen die technischen Möglichkeiten und folglich auch die Marktlage einem ständigen Wandel. Die Tendenz ist dabei im Allgemeinen, dass die Preise bei gleichzeitig zunehmender Leistungsfähigkeit sinken. Insbesondere die angeführten technischen Daten und Preisangaben sind daher stets unter diesem Gesichtspunkt zu sehen. Eine erneute Evaluierung zu einem späteren Zeitpunkt kann folglich auch zu neuen Erkenntnissen und anderen Schlussfolgerungen führen. Wo möglich, wurden deswegen Prognosen zum zukünftigen Entwicklungspotential bestimmter Verfahren gegeben.

Weiterer limitierender Faktor bei der Gegenüberstellung der unterschiedlichen Verfahren waren die zur Verfügung stehenden Geldmittel. So existieren zum Beispiel gerade in Fachgebieten wie der Medizin und der industriellen Messtechnik mehrere auch für die vorliegende Themenstellung hochinteressante, allerdings auch sehr teure Messmethoden. Detailliertere Untersuchungen beispielsweise zu Tomographie, Radar und Laserscannern wäre zwar wissenschaftlich interessant gewesen, konnten aber im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht verwirklicht werden, beziehungsweise nur in Form von einzelnen prinzipiellen Versuchen durch Hersteller oder Vertreiber derartiger Geräte. In Anbetracht der Tatsache, dass sich das vorliegende Projekt zum Ziel gesetzt hat, ein für den alltäglichen praktischen Einsatz finanzierbares „low-cost“ Verfahren zu entwickeln, erscheint diese Einschränkung allerdings als tragbar: Auch bei der wissenschaftlichen Vermessung von Pflanzen ist auf eine günstige Kosten-Nutzen-Relation zu achten.

Die zur Evaluierung herangezogene Literatur bezieht sich nur zu einem kleinen Teil auf die Vermessung von Bäumen beziehungsweise Pflanzen. Im Wesentlichen musste auf Studien aus anderen Fachgebieten, insbesondere der Physik und der Informationstechnologie, zurückgegriffen werden. Die dort gewonnen Erkenntnisse wurden auf die spezielle Messsituation im Rahmen der vorliegenden Untersuchungen übertragen und entsprechend aufbereitet. Dabei war zu berücksichtigen, dass sich die Gegebenheiten bei der Baumvermessung deutlich von den üblicherweise behandelten Messsituationen unterscheidet. Da, wie bereits angesprochen, bislang keine umfassende vergleichende Darstellung zum Einsatz unterschiedlicher 3D-Messmethoden bei der Vermessung von Baumpflanzen existiert, kann die vorgenommene Evaluierung immer nur in Teilaspekten mit den Ergebnissen anderen Studien verglichen werden.

III Einsatz zweier ausgewählter photogrammmetrischer Methoden zur Pflanzenvermessung

1 Die ausgewählten Verfahren: Silhouettenschnitt und Mehrbildtriangulation

Wie im letzten Kapitel aufgezeigt, erwiesen sich nach den gewählten Selektionskriterien photogrammmetrische Verfahren als aussichtsreichste Lösungsansätze für die gegebene Problemstellung. Insbesondere Volumenschnitt und Mehrbildtriangulation wurden im Rahmen der Evaluierung als besonders erfolgversprechend eingeschätzt. Im folgenden Kapitel sollen daher auf diesen beiden Methoden beruhende Messverfahren vorgestellt werden, die im Rahmen des vorliegenden Projektes zur dreidimensionalen Vermessung von Baumpflanzen entwickelt wurden. Zunächst (Abschnitt III. 2) wird dabei die Adaption eines kommerziell erhältlichen Verfahrens zum Volumenschnitt dargestellt und dessen Möglichkeiten, aber auch Grenzen aufgezeigt. Anschließend behandelt Abschnitt III.3 die Verwendung der Mehrbildtriangulation zur Erfassung räumlicher Kenndaten an Pflanzen.

Als wesentlicher Vorteil sowohl von Mehrbildtriangulation als auch Silhouettenschnitt im Vergleich zu anderen Ansätzen ist dabei anzusehen, dass zumindest bei der reinen Erfassung der räumlichen Rohdaten weitgehend auf existierende und in anderen Anwendungsbereichen erprobte Hard- und Software zurückgegriffen werden kann. Es war deshalb ausdrückliches Ziel, zur Lösung bestimmter Probleme bereits existierende Ansätze soweit als möglich einzubeziehen. Dies ist auch in finanzieller Hinsicht von Vorteil. Der erste Abschnitt der Vermessung kann somit auch bei Baumpflanzen in Anlehnung an bewährte Standardprozeduren vorgenommen werden. Zur Anpassungen an die Besonderheiten des komplexen Messobjektes sind in der Regel nur begrenzte Modifikationen erforderlich.

Anders stellt sich die Situation bei der anschließenden Weiterverarbeitung und Analyse der erfassten 3D-Daten dar. Im Falle konventioneller Messobjekte wird hierzu in der Regel auf standardisierte CAD/CAM-Programme zurückgegriffen, welche für diesen Einsatzbereich umfassende Funktionalität bieten. Die Auswertung von Parametern der Baumstruktur stellt allerdings deutlich andere Ansprüche an den Funktionsumfang einer entsprechenden Software. Zahlreiche Auswerteoptionen, die in diesem Fall von Interesse sind, lassen sich mit den angesprochenen handelsüblichen Programmen nur umständlich beziehungsweise überhaupt nicht durchführen.

Zwar können manche Messaufgaben weitgehend äquivalent zur entsprechenden Vorgehensweise bei technischen Objekten gelöst werden. Dazu zählt insbesondere die Erhebung einfacher geometrischer Parameter wie zum Beispiel einzelne Verzweigungswinkel sowie Ast- und Trieblängen. Probleme treten aber gerade dann auf, wenn biologisch interessante Analysen durchgeführt werden sollen. So können zwar besagte Einzelmesswerte mit handelsüblicher Software abgegriffen werden, die Einordnung in übergeordnete Strukturzusammenhänge und darauf basierende Aussagen zur Baumarchitektur sind aber auf diesem Weg nicht möglich. Auch forstlich relevante Aussagen zu Kennwerten wie der Kronenschirmfläche können mit Standardprogrammen allenfalls auf Umwegen getätigt werden.

Ein Verfahren, welches nicht nur für einzelne Messungen, sondern auch für den allgemeinen Einsatz bei größeren Messsessions geeignet sein soll, erfordert jedoch eine weitgehend automatisierte Auswertung aller erwünschten Parameter. Daher sind insbesondere bei der auf die Erfassung der Rohdaten folgenden Weiterverarbeitung eigene Lösungen unabdingbar. Zu diesem Zweck wurden im Rahmen des Projektes entsprechende Algorithmen entwickelt und als Auswertesoftware implementiert. Insbesondere im Abschnitt zum Einsatz der Mehrbildauswertung werden diese Überlegungen vorgestellt und erläutert.

2 Untersuchungen zum Volumenschnitt

Die Messmethode mit Volumen- beziehungsweise Silhouettenschnitt wurde in Kapitel II.2.2.6.6 als effektive photogrammmetrische Methode vorgestellt, um nicht nur reine Strukturdaten, sondern insbesondere vollständige räumliche Körperdaten einfach und dabei weitgehend automatisiert zu erhalten. Dieses Verfahren verbindet damit prinzipiell den Hauptvorteil der Photogrammmetrie, die absolute Kontaktlosigkeit, mit einer dennoch umfassenden Datenerhebung ohne den Bedarf aufwändiger manueller Nacharbeitung, weshalb der Silhouettenschnitt hier besonders intensiven Untersuchungen unterzogen wurde. Die Forschungsergebnisse erster Untersuchungen zur Pflanzenvermessung im Rahmen des vorliegenden Forschungsprojektes wurden bereits bei RIEDEL (2000a+b) vorab publiziert, die folgenden Ausführungen geben einen detaillierteren Einblick in die diesbezüglichen Untersuchungen.

2.1 Material und Methoden

2.1.1 Pflanzenmaterial und händische Vergleichsmessung

Als Untersuchungsmaterial wurden zunächst 27 einzeln getopfte Buchenpflanzen (*Fagus sylvatica* L.) mit Baumhöhen von 30 cm bis über 1 m herangezogen, wie sie auch in anderen Teilprojekten des SFB 607 Verwendung finden. Die Buchen befanden sich dabei im Sommerzustand, wurden also mitsamt ihrer Belaubung vermessen.

Für die als Referenz gedachte händische Vermessung wurden die Längen der einzelnen Wachstumseinheiten mit angelegten Maßbändern vermessen. Durchmessermessungen wiederum erfolgten durch Mittelung zweier Messungen mit der Schublehre, in zueinander um 90° versetzten Messpositionen. Derartige Messungen erfolgten dabei auch an den Wurzeln, um die Tauglichkeit des Verfahrens zur Erfassung auch dieses Pflanzenbestandteils beurteilen zu können.

Da das zu entwickelnde Verfahren gegebenenfalls nicht nur für forstliche Zielsetzungen, sondern auch für weitere Anwendungen im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 607 einsetzbar sein soll, wurden darüber hinaus zusätzliche Messversuche an verschiedenen anderen Nutz- und Zierpflanzen durchgeführt, auf die aber im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter eingegangen werden soll. Weitere Messdurchgänge, auch mit anderen Baumarten (Fichte), waren ebenfalls geplant, wurden jedoch aufgrund der bereits bei der Auswertung der Buchenpflanzen aufgetretenen Schwierigkeiten nicht mehr in Angriff genommen.

2.1.2 Methodik der photogrammmetrischen Aufnahme

2.1.2.1 Hard- und Software

Da das *ScanStation*-System der Firma *Dimension3D*[12] (Internet-Adresse: [7]) bereits bei der Vorauswahl (Abschnitt II.2.2.6.6) vielversprechende Ergebnisse erbrachte, wurde auch für die weiteren Untersuchungen auf diese Implementation des Volumenschnittverfahrens zurückgegriffen. Dieses Produkt beruht, wie bereits angesprochen, direkt auf den bei der Verfahrensbeschreibung zitierten grundlegenden Arbeiten. Probleme, welche im Zusammenhang mit der Pflanzenvermessung auftraten, konnten in vielen Fällen direkt in Zusammenarbeit mit der Herstellerfirma bearbeitet und gelöst werden. Der Hersteller hat von diesem 3D-Scanner unterschiedliche Ausführungen für verschiedene Genauigkeitsanforderungen und Objektgrößen im Angebot, gewählt wurde die leistungsfähigste Variante (*ScanStation VR*). Allen Versionen gemeinsam ist die Vorgehensweise, mit einer ortsfesten digitalen Kamera (Fotoapparat oder Videokamera) Bilder des auf einem Drehteller rotierbar positionierten Objektes aufzunehmen, und anschließend aus diesen zweidimensionalen Bilddaten die 3D-Informationen zu generieren. Der komplette Messaufbau ist aus Abbildung 11 ersichtlich, im folgenden werden die für die im Rahmen der Projektarbeit verwendeten Bestandteile einzeln kurz beschrieben.

a) Kamera

Das Silhouettenschnittverfahren erfordert eine große Anzahl von Fotos des zu vermessenden Objektes, die vom Computer verarbeitet werden müssen. Schon alleine deswegen verbietet sich hier der Einsatz analoger Fototechnik mit den dabei unausweichlich auftretenden Verzögerungen zwischen Aufnahme der Bilder und digitaler Weiterverarbeitung. Zudem sollte auch die Möglichkeit bestehen, die Kamera automatisiert vom Computer ansteuern zu lassen und die Bilder direkt zu übertragen. Diese Vorbedingungen schränken die Auswahlmöglichkeiten bezüglich des zu verwendenden Fotoapparates von vorneherein auf digitale Kameras ein. Zudem muss der Fotoapparat auch mit dem ansteuernden *ScanStation*-System kompatibel sein. Unterstützt werden dabei verschiedene Modelle von Videokameras und Fotoapparaten.

Da digitale Videokameras in der Regel schlechtere Auflösungen als Digitalkameras aus dem selben Preissegment bieten, fiel für die Untersuchungen die Wahl auf einen Fotoapparat vom Typ *Kodak DC 260* (siehe Abbildung 23). Es handelt sich dabei um eine Kamera, welche mit einer Auflösung von 1.536 x 1.024 Pixels zum Zeitpunkt der Untersuchungen 1998 der gehobenen Consumerklasse zuzuordnen war. Die genaueren technischen Angaben zu dieser Digitalkamera sind Abschnitt III. 3.1.2.1 zu entnehmen: Im Rahmen der Beschreibung der Mehrbildtriangulation wird hier das technisch weitgehend identische Nachfolgemodell *DC 265* vorgestellt.

b) Drehteller

Wichtige Voraussetzung für den Silhouettenschnitt ist, wie bereits erläutert, dass die Position des Messobjektes relativ zur Kamera genau bekannt ist. Dies kann auf verschiedene Weise erreicht werden. Die einfachste Lösung besteht darin, den Kamerastandort (und auch die Einstellungen, zum Beispiel Zoom) konstant zu halten und nur die Position des zu vermessenden Objektes durch Änderung des Anstellwinkels zu verändern. Je nach Genauigkeitsanforderungen und Größe des zu erfas-

12 Die Firma *Dimension3D* gehört seit dem Februar 2000 zur *Interzart AG.* Da über die weitere Namensgebung nichts bekannt ist, wird in dieser Arbeit weiter der alte Firmenname verwendet.

senden Objektes sind, wie bereits angesprochen, unterschiedliche „Turntables“ verfügbar. Die Präzision dieser Drehteller bestimmt auch den Preis des Systems - die von *Dimension3D* verfügbaren Ausfertigungen in einer Preisspanne von 2.000 („*Lite*“) bis 15.000 EUR („*VR*“) unterscheiden sich hauptsächlich in diesem Punkt. Für die Vermessungen wurde die zum Versuchszeitpunkt größte und genaueste verfügbare Ausfertigung gewählt, ein Drehteller, der mittels einer seriellen (RS-232C) Verbindung zum Computer von diesem hochpräzise eingestellt werden kann. Bei einer Belastbarkeit von bis zu 50 kg erwies er sich den untersuchten, getopften Baumpflanzen leicht gewachsen.

Um das zu vermessende Objekt zur Gewinnung der Silhouetten besser vom Hintergrund zu differenzieren, wird in der Standardausführung ein Gestell mit einfarbig grünem Hintergrund verwendet. Für die Pflanzenvermessung wurde dieses Gestell, welches die Objektgröße zudem noch auf 50 x 50 x 80 cm beschränkt, demontiert und durch einen besser kontrastierenden Hintergrund aus blauem Filzstoff ersetzt. Dieser wurde vom Format her zudem etwas größer gewählt, um auch für größere Objekte ausreichend zu sein: Die handhabbare Objektgröße wird verfahrensbedingt, neben der Tragfähigkeit des Drehtellers, nur von der Größe des einfarbigen Hintergrundes, also einer relativ einfach zu modifizierenden Größe, begrenzt. Abbildung 11 zeigt den prinzipiellen Messaufbau beim Volumenschnittverfahren.

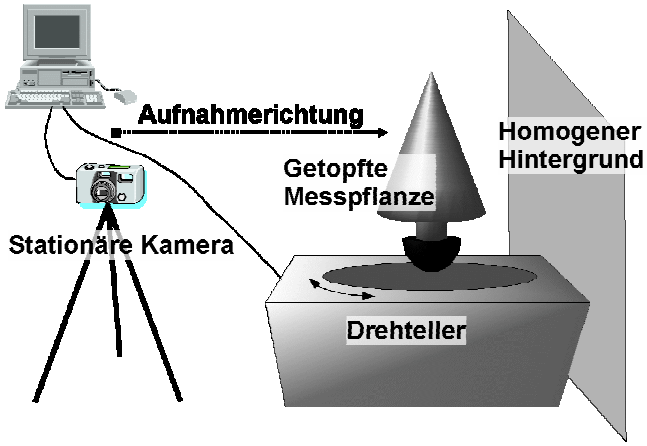

Abbildung 11: Messaufbau beim Silhouettenschnitt mit dem *ScanStation*-System.

c) Photogrammmetrie-, CAD- und Grafiksoftware

Zur synchronisierten Ansteuerung von Digitalkamera und Drehteller sowie zur photogrammmetrischen Auswertung kommt das Softwarepaket *ScanWare* zum Einsatz. Im konkreten Fall wurde die Version 1.1 verwendet (DIMENSION3D SYSTEMS GMBH, 1998), ergänzt mit einigen manuell eingespielten, aktuelleren Programmbestandteilen. Diese wurden vom Hersteller speziell für die Untersuchungen in experimentellen Vorabversionen zur Verfügung gestellt. Im Einzelnen handelte es sich bei diesen Patches um ein erweitertes Treibermodul für die verwendete Digitalkamera (Ansteuerung über die USB-Schnittstelle) und eine optimierte Version einer GUI-Komponente.

Die Software stammt aus dem Unix-Sektor, da das System ursprünglich für *Silicon Graphics* Workstations unter dem Betriebssystem *Irix* entwickelt wurde. Bei der Portierung auf die *Windows*-Plattform wurde allerdings die Unix-typische Struktur und die Verwendung der Skriptsprache *Tcl/Tk* für die graphische Benutzeroberfläche beibehalten. Dies hat den Vorteil, dass sich der Benutzer eigene Skripts beziehungsweise kleinere Anpassungen an die eigenen Verhältnisse zusammenstellen kann. Im Wesentlichen beruht das System softwaremäßig auf mehreren separaten Programmmodulen, die

durch eine gemeinsame Benutzeroberfläche zusammengefasst sind, aber auch flexibel von der Kommandozeile aus einzeln aufgerufen werden können. Kernbestandteile sind die Module „`calibrate.exe`“ für die automatisierte Kalibrierung, „`keying.exe`“ zur Berechnung der Silhouetten, „`silcut.exe`“ zum Durchführen des eigentlichen Volumenschnitts, „`trivox.exe`“ zur Berechnung der Polygonoberfläche und „`texture.exe`“ für die abschließende Texturierung.

Zur separaten Darstellung der im programmspezifischen SPX-Format gespeicherten Objekte ist das Programm *SPXView* gedacht. *Marlin* (Version 1.4.0.1) ist ein Programm, um die von *ScanWare* erzeugten Dateien in diesem Format in gängige andere Formate (DXF, VRML etc.) zu konvertieren. Da dieses Produkt erst zu einem späteren Zeitpunkt verfügbar wurde, wurde anfangs zum selben Zweck ein Kommandozeilen-Tool namens *SPX2DXF* eingesetzt, welches von der Herstellerfirma für die Untersuchungen zur Verfügung gestellt wurde.

Für die auf die Erfassung folgenden ersten Auswertungen der gemessenen räumlichen Daten wurde auf gängige Standardsoftware aus dem Computergrafik-Bereich zurückgegriffen. Hierbei kamen vorwiegend die folgenden Produkte zum Einsatz:

- *Bentley Microstation SE Academic Edition* (Version 5.07.00.41): Dieses CAD-Programm (im Internet: [9]) bietet als ausgewachsenes Profi-CAD-System prinzipiell alle Optionen, um zwei- und dreidimensionale Daten umfassend zu analysieren. Diese Funktionen sind allerdings nicht auf den speziellen Anwendungsfall der Pflanzenvermessung zugeschnitten.

- *Autodesk VoloView Express* (Version 2, Build 627) ist eine frei verfügbare Software vom Hersteller des CAD-Paketes *AutoCAD* (Internet-URL: [10]). Es dient zum schnellen Anzeigen und Visualisieren von 2D/3D-Daten im DXF-Format.

- *Actify 3D View* (Versionen 3.51 und 4.0), Internet-URL [11], ist ein umfassendes Grafiktool, welches die unterschiedlichsten 3D-Formate, natürlich auch geläufige DXF-Dateien, lesen und konvertieren kann. Dabei können auch einfache Messungen (zum Beispiel Distanzen und Winkel zwischen Geraden) vorgenommen werden.

Für die vorliegenden Untersuchungen wurde ein handelsüblicher Rechner, der zum Zeitpunkt der Messungen die obere Leistungsklasse im Standard-PC-Bereich markierte, mit dem Betriebssystem *Windows 98*[13] (bei späteren Untersuchungen *Windows 2000*) eingesetzt (Pentium II 450 Mhz, 128 MB RAM).

2.1.2.2 Vorgehensweise bei der Pflanzenvermessung

a) Einrichten und Kalibrieren das Messsystems

Vor jedem Messdurchgang muss grundsätzlich das System Messkamera-Drehteller eingerichtet werden. Dazu werden zunächst die für das jeweilige Messobjekt geeigneten Voraussetzungen bezüglich Kameraposition, Kameraeinstellung (insbesondere Zoom) sowie Beleuchtungsverhältnissen eingerichtet. Danach ist prinzipbedingt eine Kalibrierung des Messsystems erforderlich. Hierdurch werden zum einen die durch die Kamera an sich verursachten Verzerrungen (bedingt durch Optik, Aufzeichnungsmedium etc.) ausgeglichen, also die innere Orientierung wieder hergestellt. Weiter-

13 *Windows 98* wurde anstelle des eigentlich für professionelle Anwendungen zu bevorzugenden *Windows NT 4.0* verwendet, da zum Zeitpunkt der Messungen nur unter diesem Betriebssystem eine Ansteuerung der Digitalkamera über die USB-Schnittstelle möglich war.

hin wird die relative äußere Orientierung des Fotoapparats zum Drehteller berechnet. Somit darf nach Abschluss der Kalibrierung weder an den „inneren“ Kameraeinstellungen, insbesondere am Zoom, noch an der Positionierung der Kamera irgend etwas manuell geändert werden. Alle weiteren Änderungen werden, wenn überhaupt nötig, nur noch definiert über die Software vorgenommen und können somit in den Berechnungen berücksichtigt werden.

Im *ScanStation*-System erfolgt die Kalibrierung mit Hilfe eines zweidimensionalen Kalibriermusters, welches anstelle das Messobjektes auf den Messteller gestellt wird (siehe Abbildung 12). Das Kalibriermuster besteht aus in Reihen angeordneten Punkten bekannter Größe und Position (schwarz auf weißem Hintergrund), den sogenannten Kontrollpunkten. Von diesem Muster wird in sechs Positionen des Drehtellers je eine Aufnahme gemacht, durch die unterschiedlichen Anstellwinkel wird somit eine Dreidimensionalität der Kontrollpunkte erreicht. Aufgrund der Tatsache, dass für jede Aufnahme sowohl die relative Position der Messpunkte auf dem Kalibriermuster als auch der jeweilige Drehwinkel bekannt sind, können die innere und äußere Orientierung der Kamera errechnet werden. Dies kann über die *ScanWare*-Software, mittels entsprechener Bilderkennungsalgorithmen zur Erkennung der Kontrollpunkte, innerhalb weniger Minuten automatisiert erfolgen. Die Kalibrierung beruht dabei im Wesentlichen auf den bereits beschrieben Prinzipien des Rückwärtschnittes.

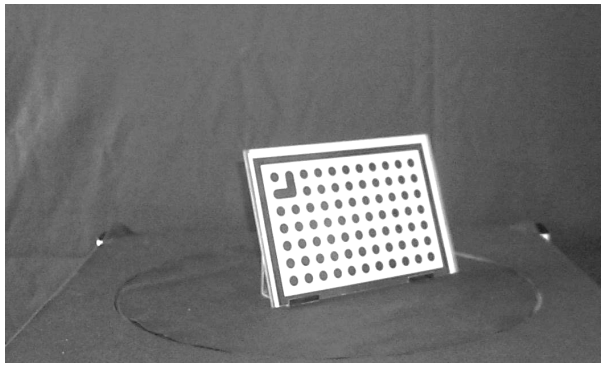

Abbildung 12: Kalibrierung des ScanStation-Systems unter Verwendung eines Kalibriermusters, welches in sechs verschiedenen Anstellwinkeln fotografiert wird.

b) Fotografische Erfassung

Für die eigentliche Vermessung wird das Messobjekt anstelle des Kalibriermusters auf den Drehteller gestellt, wie in Abbildung 13 dargestellt. Die Anzahl der unterschiedlichen Aufnahmepositionen ist einstellbar, standardmäßig ist hierfür ein Wert von 36 vorgegeben. Dies bedeutet, dass alle 10° Drehung des Drehtellers ein Bild des Objektes aufgenommen und direkt zum Computer übertragen wird. Für detailreiche Objekte wie Pflanzen empfiehlt es sich allerdings, wie durch die modular veränderbare Struktur der Software möglich, diesen Wert stets auf mindestens 72 Aufnahmen (Schrittweite des Anstellwinkels 5°) zu erhöhen. Untersuchungen mit geringerer Aufnahmedichte ergaben nur unbefriedigende Ergebnisse für die komplexen Messobjekte. Die Durchführung der Aufnahmen und die Synchronisierung mit dem Drehteller-Anstellwinkel erfolgt wiederum vollständig softwaregesteuert und ohne weiteres Zutun des Bedieners: *ScanWare* nimmt Einstellungen wie die Wahl des optimalen Bildformates (unkomprimiertes Windows-Bitmap-Format `*.BMP`, siehe Abschnitt II.2.2.6.1), An- und Abschalten der Beleuchtung sowie die korrekte Ansteuerung des Drehtellers automatisch vor.

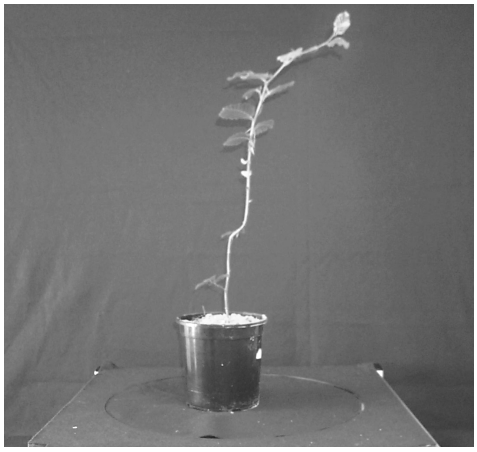

Abbildung 13: Eine von bis zu 72 Aufnahmen des Messobjektes bei unterschiedlichen Anstellwinkeln des Drehtellers.

c) Berechnen der Silhouetten

Mit diesen Aufnahmen ist die Erfassung des Ausgangsdatenmaterials für die Objektvermessung abgeschlossen, es kann nötigenfalls zu diesem Zeitpunkt für spätere Messungen archiviert werden. Die weiteren Verarbeitungsschritte erfolgen vollständig am Computer. Im ersten Schritt werden dazu die Silhouetten des Objektes mittels Chroma-Keying errechnet. Dazu muss der Software als Eingangsparameter für diesen Rechenschritt der Farbton des Hintergrundes durch Markieren eines Teilbereichs davon mitgeteilt werden. Beispiele für die Resultate des Chroma-Keying - alle dem selben Messprojekt entnommen wie Abbildung 13 - sind der folgenden Darstellung zu entnehmen. Es ist hier deutlich zu erkennen, dass auf den schwarz-weißen Bildern noch dem Messobjekt nicht zugehörige Störungen auftreten, zum Beispiel durch Falten im Bildhintergrund und andere Schattenwürfe. Für die weitere Berechnung sind diese allerdings irrelevant, da sie im Zuge des Silhouettenschnittes herausgerechnet werden. Wichtig ist in diesem Schritt vor allem, dass die Silhouette des Messobjektes auf allen Bildern deutlich abgegrenzt zu erkennen ist. Zu diesem Zweck sind gegebenenfalls Feineinstellungen des Chroma-Keying nötig.

Abbildung 14: Beispiele für die aus den Messbildern berechneten Silhouetten (Anmerkung: Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde hier das Negativbild der eigentlichen Darstellung durch *ScanWare* - weißes Objekt auf schwarzem Hintergrund - gewählt).

d) Silhouettenschnitt

Nach dem Generieren obiger Silhouetten erfolgt der eigentliche Silhouettenschnitt: Nur Punkte, die in jedem Bild an derselben räumlichen Position identifiziert wurden, werden dabei auch zur Berechnung des Volumenkörpers herangezogen. Sobald auf einer Bildposition an der Stelle, an der ein Punkt unter Berücksichtigung des geänderten Anstellwinkels eigentlich abgebildet sein sollte (schwarze Farbe in Abbildung 14), nichts zu erkennen ist (weiße Farbe), fällt dieser Punkt aus der weiteren Berechnung hinaus. Auf diese Art und Weise werden auch die in Abbildung 14 noch deutlich sichtbaren Störungen herausgerechnet: Da sich diese bei der Drehung nicht mit dem Messobjekt bewegen, haben sie sich aus Softwaresicht relativ zum Messobjekt bewegt und werden nicht weiter beachtet. Das 3D-Volumenmodell wird sozusagen „ausgeschnitten“. Das Resultat des Silhouettenschnittes ist als Draufsicht in Abbildung 15 zu sehen.

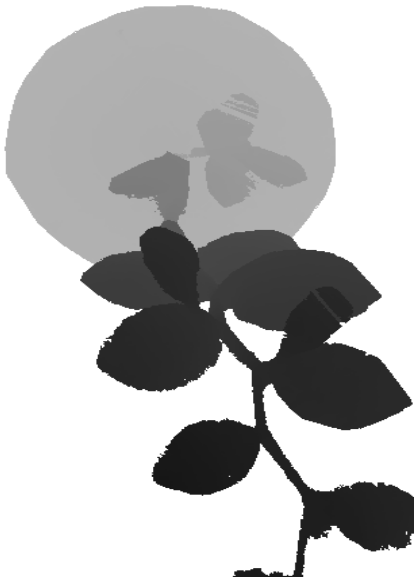

Abbildung 15: Resultat des Volumenschnittes: Aufsicht auf die Messpflanze nach dem Verschneiden von 72 Silhouetten.

Diese Eigenart des Messprinzips kann man sich auch für Vereinfachungen des Messvorganges zu Nutze machen: Will man zum Beispiel den Topf in obigem Beispiel nicht mit berechnen, reicht es aus, ihn auf einem Silhouettenbild mit der Hintergrundfarbe einzufärben. Ebenso kann die weitere Berechung mit dieser Methode nur auf bestimmte, für die weitere Vermessung interessante Pflanzenteile beschränkt werden. Die entsprechenden manuellen Nachbearbeitungsfunktionen für die Silhouettenbilder sind in die *ScanWare*-Software deswegen bereits integriert. Natürlich kann dieser Effekt auch durch Nachbearbeitung der Silhouettenbilder mit externer Bildbearbeitungssoftware erreicht werden, was gegebenenfalls für eine Automatisierung dieses Vorgangs von Interesse ist.

Als Parameter ist bei diesem Vermessungsschritt lediglich die Zahl der zu verwendeten Voxels einstellbar. Ein Voxel ist sozusagen das dreidimensionale Äquivalent eines Pixels (siehe Abschnitt II. 2.2.6.1) und stellt die kleinste einzeln ansprechbare Raumeinheit eines Volumenbereiches dar. Jedes einzelne Voxel, welches somit als würfelförmiger Ausschnitt des Messraumes zu betrachten ist, kann nur zwei Zustände haben: „Raumbereich wird vom Objektkörper besetzt“ und „Raumbereich ist frei“. Das heißt, je höher dieser Wert gewählt wird, desto feiner wird der zu vermessende Raum aufgeteilt. Allerdings steigt dann auch die zu verarbeitende Datenmenge. Schon bei der Vorgabe von 256 für diesen Messparameter ist ein 3D-Raum mit einer Auflösung von über 16 Millionen Vo-

xel zu bearbeiten (256^3 = 16.777.216). Im Folgenden wird der Begriff „Voxel-Auflösung“ zur Beschreibung dieses wichtigen Messparameters verwendet.

Resultat des Silhouettenschnittes sind die ersten 3D-Rohdaten. Es werden dabei im programminternen SPX-Format (`*.SPX`) die räumlichen Daten der das Messobjekt umschließenden Punkte abgespeichert. In Abbildung 16 ist dies anhand der Beispielpflanze aus zwei Blickwinkeln dargestellt. Es handelt sich um die Resultate eines Volumenschnitts mit 2.048 Voxel Auflösung, das berechnete Volumenmodell der Baumpflanze besteht aus deutlich über 400.000 3D-Punkten. Genaueres zu den anfallenden Datenmengen ist der entsprechenden Diskussion in Abschnitt III.2.2.1 zu entnehmen.

Abbildung 16: Volumenmodell der Baumpflanze aus unterschiedlichen Perspektiven, berechnet bei hohen Qualitätseinstellungen (Anmerkung: 3D-Darstellungen entnommen aus dem Programm *SPXView/Linux* mit Einstellung „Point-Antialiasing“).

Um die Unterschiede bei Kalkulation mit verschiedenen Voxel-Einstellungen herauszuarbeiten, zeigt Abbildung 17 die Ergebnisse bei den Voxel-Auflösungen 256 (Vorgabe), 512, 1.024 und 2.048. Die Anzahl der das 3D-Objekt repräsentierenden räumlichen Punkte wächst dabei von gut 5.000 bis auf über 400.000 an. Schon anhand dieser Zahlen wird klar, dass es sich hierbei um ein rechenintensives Messverfahren handelt - für das Messobjekt Pflanze gilt wie immer, dass die Auflösung nicht hoch genug sein kann. Der deutlichste Qualitätssprung findet bei der Erhöhung der Voxel-Auflösung von 256 auf 512 statt, aber gerade die Details gewinnen auch noch bei einer weiteren Erhöhung der Auflösung.

Gut zu beobachten ist dies im vorliegenden Fall insbesondere am unteren Teil des Sprosses. Die insbesondere für Messzwecke notwendige verbesserte Detailtreue bei höheren Voxel-Auflösungen lässt sich leider nur schlecht im Rahmen der Druckauflösung wiedergeben. Problematische Bereiche für die Erfassung sind insbesondere die Blatt-Zweig-Übergänge. An dieser Stelle soll im Vorgriff auf Abbildung 18 hingewiesen werden, welche einen in 1.024er-Auflösung berechneten Abschnitt der Beispielpflanze zeigt: Hier sind deutlich die Ungenauigkeiten gerade in diesen Bereichen festzustellen. Hier ist eine noch höhere Auflösung des Systems wünschenswert.

Abbildung 17: Ergebnisse das Volumenschnittes mit unterschiedlichen Parametereinstellungen. Von links nach rechts: Auflösung 256 Voxel, 512 Voxel, 1.024 Voxel und 2.048 Voxel.

e) Erstellen des kompletten 3D-Modelles

Bislang liegen die 3D-Daten noch nicht in einem direkt weiter verwertbaren Format vor. Zwar kann das menschliche Gehirn aus der Voxel-Ansammlung die Form einer Baumpflanze abstrahieren, für eine Computerauswertung reichen die vorliegenden Daten aber noch nicht aus. Dafür sorgt erst der folgende Arbeitsschritt, die Triangulation der Oberfläche. Die Triangulation hat in diesem Fall nichts mit der bereits vorgestellten Triangulation als Rechenmethode in Dreiecken zu tun, es handelt sich hier vielmehr um den Rechenschritt, welcher erforderlich ist, um die gemessenen Punkte zu einer zusammenhängenden Oberfläche zu verbinden. Diese Oberfläche wird, typisch für die Computergrafik, als Polygonnetz aus Dreiecken konstruiert. Für diese Triangulation können als Parameter (jeweils in der Einheit Voxel) der maximale Fehler und die maximale Größe der zu erzeugenden Dreiecke eingestellt werden, für die Texturierung stehen verschiedene Qualitätsstufen für die Oberflächenfotos zur Auswahl. Tabelle 5 stellt die einzelnen Schritte der Berechnung eines vollständigen 3D-Objektes in von links nach rechts zunehmender Komplexität dar.

Tabelle 5: Aufbau des 3D-Modells in den einzelnen Bearbeitungsstufen

Art der Objektdarstellung	Volumenmodell (Schritt 1)	Drahtgittermodell (Schritt 2)	Texturiertes Modell (Schritt 3)
Bestandteile des 3D-Objektes	Einzelelemente im Raum (Voxels)	zusammenhängende Dreiecke zwischen den Einzelpunkten (Gitternetz-Darstellung, Polygonnetz)	Dreiecke mit zusätzlichen Informationen über die Oberflächenfarbe

In Abbildung 18 sind die einzelnen Schritte vom Volumen- über das Drahtgitter- („Wireframe“) bis zum endgültigen texturierten Modell, welche in obiger Tabelle in Textform beschrieben wurden, zur Verdeutlichung am konkreten Beispiel grafisch dargestellt. In diesem Fall wurden Triangulation

und Texturierung nur für einen Teil der vermessenen Pflanze durchgeführt. Dafür wurde eine der berechneten Silhouetten, wie bereits in Unterpunkt d) beschrieben, entsprechend nachbearbeitet, so dass nur noch der zu vermessenden Teilbereich in die weitere Analyse einging.

Weitere Methoden, um Punktewolken zu polygonisieren, stellt zum Beispiel DUWE (1999) vor. Gerade im CAD/CAM-Bereich ist dieser Vorgang häufig erforderlich, daher gibt es für diesen Bereich spezialisierte Softwarelösungen für diese Problemstellung.

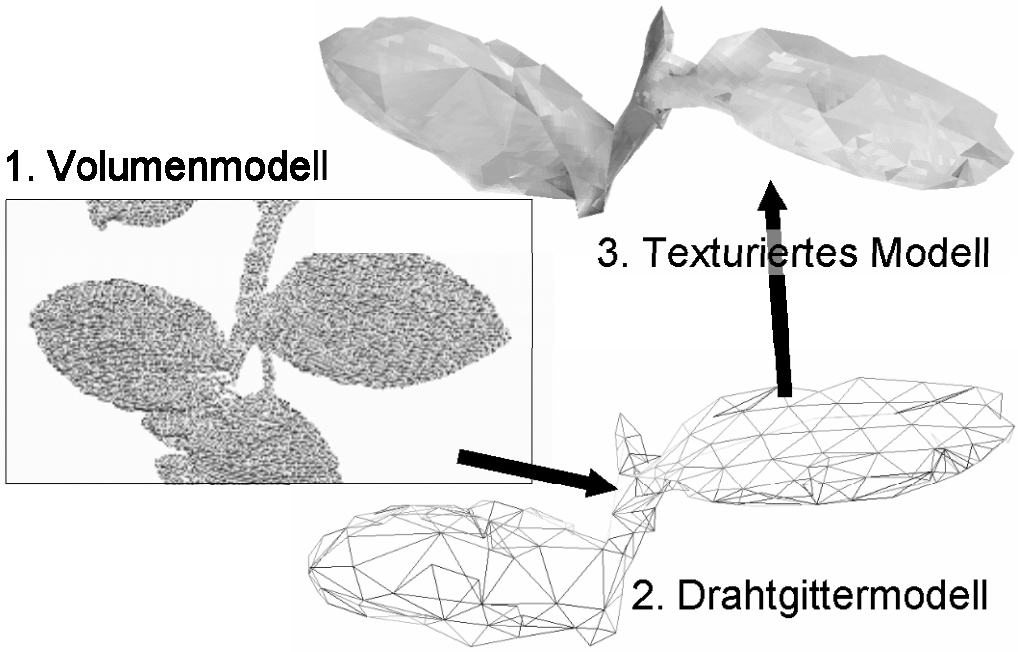

Abbildung 18: Generieren eines vollständig texturierten 3D-Objektes (im Original farbig) aus den Volumendaten. Projekt berechnet mit einer Voxel-Auflösung von 1.024.

Das geschilderte Verfahren ist prinzipiell nicht nur bei forstlichen Pflanzen einsetzbar. Verschiedene andere Pflanzen eignen sich, aufgrund ihrer einfacheren Gestalt, sogar durchaus besser für eine komplette Vermessung mit der *ScanStation*. Daher wurden, wie bereits einleitend dargelegt, auch an nicht-forstlichen Pflanzungen Messungen vorgenommen. Abbildung 19 zeigt dies exemplarisch für eine im Rahmen der Untersuchungen (als Messprojekt 3) erfasste Engelstrompete (*Datura suaveolens*).

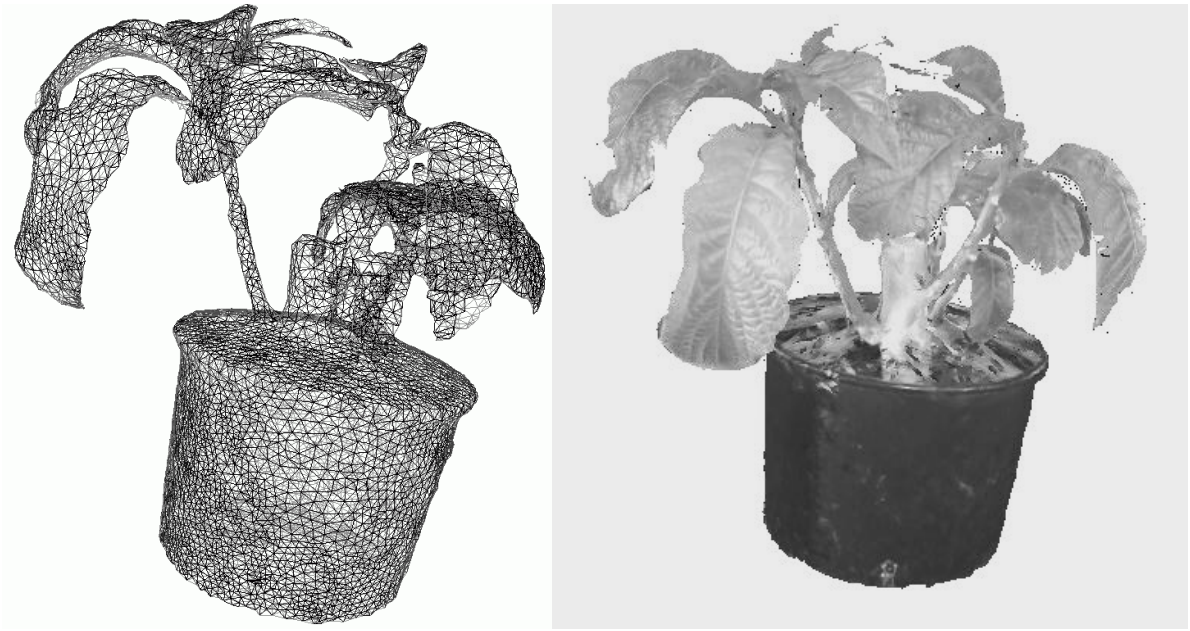

Abbildung 19: Drahtgittermodell (links) und vollständig texturiertes räumliches Modell (rechts) einer getopften Zierpflanze.

Sollen auch Wurzeln nach diesem Verfahren vermessen werden, so müssen diese zunächst freigelegt und sorgfältig gewaschen werden. Dies ist ein grundsätzliches Problem praktisch aller existierender Messverfahren (BÖHM, 1979) und lässt sich nur durch den Einsatz bestimmter tomographischer Methoden oder Radar (BUTNOR et al., 2001; HRUSKA et al., 1999) vermeiden. Abbildung 20 zeigt das Scanergebnis bei einer durch ein Stativ fixierten Buchenwurzel. Es wird gerade bei der Wurzel besonders deutlich - wie es sich auch schon bei den Blattstielen aus Abbildung 18 angedeutet hat - dass bei der Vermessung in der momentan möglichen Auflösung zahlreiche Details verloren gehen. Einzelne Wurzeln der jungen Baumpflanzen sind so nicht mehr zu unterscheiden. Eine Vermessung der Grobwurzeln an ausgewachsenen Pflanzen erscheint jedoch durchaus denkbar.

Abbildung 20: Volumenbild einer mit der *ScanStation* erfassten Buchenwurzel (eingespannt in ein Stativ).

2.1.2.3 Auswertung der 3D-Daten

Nach dem Durchlauf des Teilprogrammes für den Silhouettenschnitt können die Baumdaten zwar schon mit spezieller Software (*Marlin, SPX2DXF*) in das für 3D-Objekte allgemein übliche DXF-Format konvertiert werden. Sinn macht dies für Messzwecke allerdings erst frühestens nach der Triangulation, weil dann zusammenhängende Objekte und nicht nur Punkteanhäufungen im Raum vorhanden sind. Deswegen bietet *ScanWare* selber auch erst ab diesem Punkt einen Datenexport in diverse gängige 3D-Formate an.

Auch für die Vermessung im Rahmen der vorliegenden Arbeit macht eine Weiterverwendung erst nach der Triangulierung Sinn, besser noch erst nach Abschluss der Texturierung, da erst dann Körperdaten vernünftig gemessen werden können. Strukturdaten hingegen könnten theoretisch bei manueller Kennzeichnung auch bereits direkt nach dem Silhouettenschnitt berechnet werden, da die hierfür nötigen Punktinformationen bereits vorliegen. Diese Vorgehensweise soll im Folgenden allerdings nicht weiter verfolgt werden.

Anhand einiger beispielhafter Messungen mit einem CAD-System soll verdeutlicht werden, welches Potential eine Vermessung mit dem Volumenschnittverfahren hat. Wie aus den Abbildungen 21a und 21b zu ersehen ist, bestehen vielseitige Möglichkeiten, 3D-Drahtgittermodelle zu vermessen. Während die Volumen- und Oberflächenmessungen, wie sie in der Teildarstellung 21a rechts zu sehen sind, direkt durch Markieren des zu vermessenden Objektbestandteils durchgeführt werden können, muss zum Errechnen vom Strukturdaten ein Zwischenschritt vorgenommen werden: Für die Bemaßungen (siehe Teilabbildung 21a links) und die Winkelmessung (Abbildung 21b) sind entsprechende Funktionen der CAD-Software zu benutzen, um Achsen in Volumenkörper zu legen. Diese Achsen können dann vermessen werden. Die Details dieser Vorgehensweise hängen dabei von der eingesetzten CAD-Software ab.

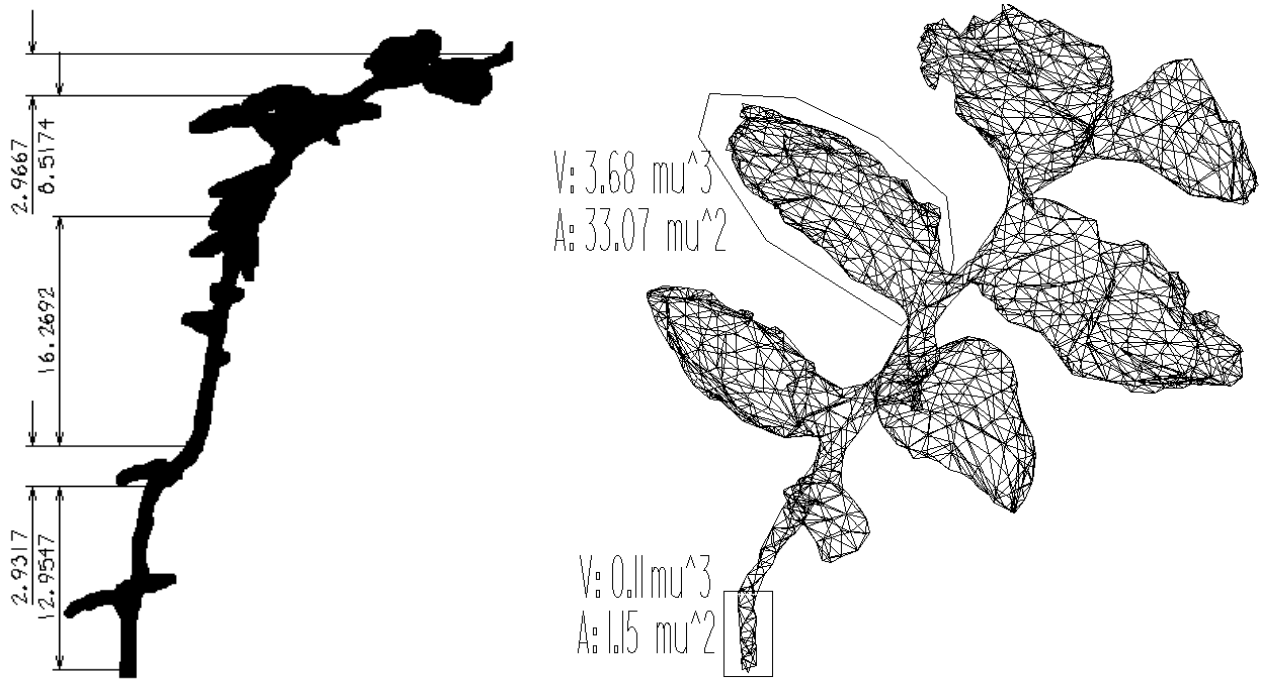

Abbildung 21a: Messungen an Drahtgittermodellen mittels Standard-CAD-Software. Links: Längenbemaßung von Zweigabschnitten. Rechts: Volumen- (V) und Oberflächenberechnung (A) an Blättern und Zweigabschnitten (mu = measurement unit = Zentimeter).

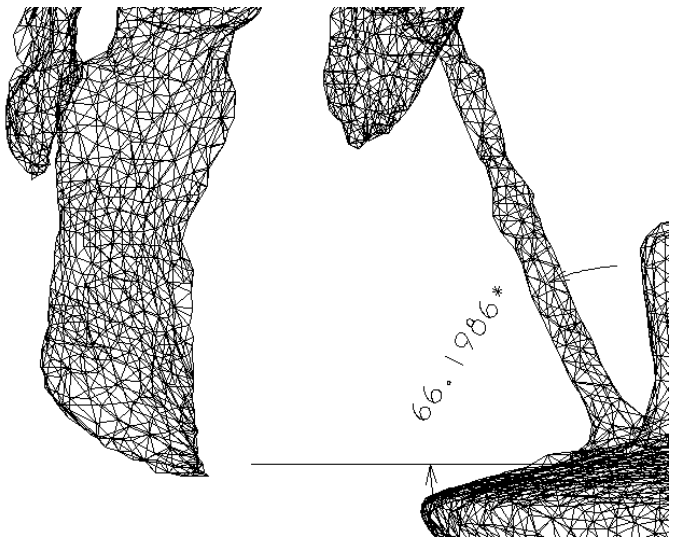

Abbildung 21b: Messungen an Drahtgittermodellen mittels Standard-CAD-Software. Hier: Winkelmessung zwischen konstruierten Achsen.

2.2 Ergebnisse

2.2.1 Umfang des zu verarbeitenden Datenmaterials

Dieser Gesichtspunkt wird bewusst als erster Punkt für die Evaluierung des Volumenschnittes als Verfahren zur Pflanzenvermessung aufgeführt. Wie schon in den vorangehenden Absätzen anklang, erweisen sich nämlich die anfallenden Datenmengen als der limitierende Faktor für den praktischen Einsatz des Silhouettenschnittes. Die folgenden Ausführungen sollen den Umfang der vom Computer zu verarbeitenden Informationen illustrieren.

Wie bei der Beschreibung der digitalen Photogrammmetrie bereits erläutert, ist zum Erreichen einer hohen Genauigkeit der Einsatz von verlustfrei komprimierenden Verfahren zur Bildspeicherung erforderlich. Aus Geschwindigkeitsgründen verwendet *ScanWare* daher das unkomprimierte *Windows*-Bitmap-Format (`*.BMP`), sowohl auf der Festplatte als auch für die Bearbeitung im Speicher. Bei der verwendeten Kameraauflösung von 1.536 x 1.024 Pixel mit 24 Bit Farbtiefe ergibt sich für ein einzelnes Farbbild ein Speicherbedarf von 4,5 Megabytes, selbst für die in 256 Graustufen (8 Bit Farbtiefe) abgespeicherten zugehörige Silhouetten werden noch jeweils 1,5 Megabytes benötigt.

Allein die Kalibrierung benötigt für die zu verarbeitenden Bilder (sechs Stück, jeweils in Farbe und in schwarz-weiß) 36 Megabytes Speicherplatz. Noch bedeutender wird dieser Kapazitätsbedarf beim eigentlichen Silhouettenschnitt: 72 Farbbilder und die zugehörigen Silhouetten belegen 432 Megabytes Speicher auf dem Datenträger. Allerdings werden davon für die konkrete Verschneidung in diesem Verfahrensschritt nur die Silhouetten (108 Megabytes) in die Berechnung einbezogen. Für eine bloße Archivierung der Foto-Daten eines Messprojektes ist somit fast eine komplette Compact Disc als Datenträger einzuplanen.

Bis zu diesem Schritt ist die Datenmenge von der eingesetzten Hard- und Software problemlos zu handhaben, da die benötigten Daten meistens auch nicht gleichzeitig im Speicher gehalten werden müssen. Lediglich bei Voxel-Auflösungen über 2.048 im Silhouettenschnitt traten in erhöhtem Maße Programmabbrüche auf, daher wurde dieser Wert auch als Obergrenze für die Untersuchungen gewählt. Beispielhaft für die durch die diversen Algorithmen zu handhabenden Datenmengen

sei an dieser Stelle wieder die in den vorangehenden Abschnitten vermessene Pflanze (Messprojekt 12) dargestellt: Tabelle 6 zeigt den Zusammenhang zwischen eingestellter Voxel-Auflösung und dem Umfang des daraus entstehenden Volumenmodells.

Tabelle 6: Beispielhafte Darstellung des Zusammenhanges zwischen eingestellter Voxel-Auflösung und der daraus resultierenden Anzahl räumlicher Punkte des Volumenmodells sowie dessen Dateigröße.

Voxel-Auflösung	256	512	1.024	1.536	2.048
Voxels im gesamten Messraum	16.777.216	134.217.728	1.073.441.824	3.623.878.656	8.589.934.592
Messobjekt zusammengesetzt aus n Voxels	5.620	25.128	104.384	236.248	421.964
Dateigröße im SPX-Format	67 KB	295 KB	1224 KB	2768 KB	4.946 KB

Es ist zu beachten, dass die angegebenen Werte je nach Objekt sehr stark variieren können, allgemeine Gesetzmäßigkeiten können aus diesen Werten somit nicht hergeleitet werden. Es lässt sich lediglich die Faustregel formulieren, dass eine Verdoppelung der Voxel-Auflösung - was einen Anstieg der getrennt zu behandelnden Gesamt-Voxel um das Achtfache bedingt - dazu führt, dass das entstehende 3D-Modell aus etwa viermal so vielen Punkten besteht. Wenn man bedenkt, dass somit bei der höchsten verwendeten Auflösung die Positionierung von gut 400.000 Punkten in einem Gesamtraum von über acht Milliarden Voxels berechnet werden muss, wird klar, was für Anforderungen dieses Verfahren an die eingesetzten Computer stellt.

Probleme traten allerdings erst gehäuft bei der Triangulierung des Objektes auf. Hier besteht bei der Projektbearbeitung das Dilemma, dass einerseits genügend Voxels definiert sein müssen, damit die Polygonisierungsroutine daraus sinnvoll zusammenhängende Dreiecke bilden kann. Andererseits überfordert die dadurch exponential ansteigende Datenmenge bei höheren Voxel-Auflösungen sehr schnell den Computer. Deswegen kam es ab dem Arbeitsschritt der Triangulierung sehr häufig zu Fehlfunktionen des Programms. Es war dabei nicht eindeutig feststellbar, ob diese an Fehlern in der *ScanWare*-Software selber lagen oder durch Probleme der verwendeten Betriebssysteme *Windows 98* und *2000* auf unzureichend leistungsfähiger Hardware bedingt wurden. Deswegen war es nur in seltenen Fällen überhaupt möglich, vollständige Modelle zu berechnen. Lediglich bei einer Beschränkung auf einzelne Pflanzenbestandteile konnten fertige 3D-Objekte berechnet werden. Dies wurde zum Beispiel auch im Falle von Abbildung 18 derart gehandhabt.

Aus diesen Gründen können auch keine weiteren Aussagen zur Qualität und praktischen Nutzbarkeit der Texturierungsfunktionalität gemacht werden: Diese an sich für Oberflächenanalysen zum Beispiel von Blättern sehr nützliche Funktion setzt ein Polygonmodell voraus. Da diese Vorbedingung allerdings selten erfüllt werden konnte, fehlte auch eine ausreichende Anzahl an texturierten Objekten für weitere Untersuchungen.

2.2.2 Zeitliche Gesichtspunkte

Die reine Erfassung der Objekte kann, wie bereits dargelegt, relativ schnell und weitgehend automatisch erledigt werden: So benötigt die Kalibrierung mit der beschriebenen Aufnahmekonfiguration lediglich 2,5 bis 3 Minuten. Wenn man im Rahmen einer größeren Messsession zahlreiche Pflanzen mit den selben Kamera-Einstellungen vermessen will, kann man zudem die Kalibrierungsdaten wiederverwenden. Diese Vorgehensweise wird allerdings vom Programm direkt nicht unterstützt, sie

muss durch manuelles Umkopieren der entsprechenden Dateien erfolgen. Es bietet sich an, hierfür ein „Default"-Projekt, bestehend lediglich aus den Kalibrierungsdaten, anzulegen.

Die anschließenden Fotoaufnahmen der Pflanze benötigen bei 72 Aufnahmen 24 Minuten, bei Verwendung der Vorgabe von lediglich 36 Aufnahmen die halbe Zeit. Je nach Art der Pflanze sind hier jedoch zusätzliche Verzögerungszeiten durch kleine Änderungen am Programmcode einzuplanen, um die nach der Drehteller-Veränderung oftmals schwankende Pflanze vor der Aufnahme noch zur Ruhe kommen zu lassen.

Zeitaufwändig sind dann allerdings die weiteren Rechenschritte. Das Chroma-Keying zur Silhouettenberechnung ist zwar innerhalb weniger Minuten vollbracht, der Silhouettenschnitt selber dauert dann allerdings geraume Zeit. In Anlehnung an Tabelle 6 sind in Tabelle 7 die ungefähren Zeiten für das bereits vorangehend als Beispiel herangezogene Messprojekt 12 aufgeführt. Diese sind wiederum nur als Anhalt zu betrachten, und natürlich in hohem Maße nicht nur vom vermessenen Objekt abhängig, sondern auch von der Leistungsfähigkeit des verwendeten Computers. Daher wird an dieser Stelle auf weitere konkrete Zeitangaben verzichtet.

Tabelle 7: Beispielhafte Darstellung des Zusammenhanges zwischen gewählter Voxel-Auflösung und der für die Berechung des Volumenmodells benötigten Zeit.

Voxel-Auflösung	256	512	1.024	1.536	2.048
Zeitaufwand für den Silhouettenschnitt (ca.)	7 min	21 min	45 min	1 h 53 min	5 h

Es ist hier zu beachten, dass diese Berechnungen automatisch ablaufen, ohne weitere Eingriffe des Bedieners zu erfordern. Der Computer ist allerdings in diesem Zeitraum ausgelastet und, insbesondere in den höheren Auflösungen, für andere Tätigkeiten kaum sinnvoll zu verwenden.

Ebenfalls als sehr zeitaufwendig stellen sich die folgenden Arbeitsschritte der Triangulierung und Texturierung da, die allerdings wiederum weitgehend ohne Zutun des Bedieners ablaufen. Da, wie bereits dargestellt, die meisten Messprojekte an dieser Stelle scheiterten, können hierfür leider keine aussagekräftigen Zeitangaben gemacht werden. Es sei nur als Beispiel das Messprojekt aus Abbildung 19 genannt, welches, in einer relativ niedrigen Voxel-Auflösung von 256 berechnet, aus lediglich 12.692 Punkten besteht. Dennoch musste der Rechner zur Triangulierung der daraus entstehenden 24.882 Polygone zwei Tage rechnen. Auch für bloße kleine Ausschnitte in höherer Auflösung, wie in Abbildung 18 dargestellt, ist mit einem mehrstündigen Programmdurchlauf zu rechnen. Ähnlich ist auch für eine darauf folgende, hochqualitative Texturierung viel Zeit einzuplanen.

2.2.3 Messgenauigkeit

Ein entscheidender Gesichtspunkt für die Eignung eines Verfahrens für Messarbeiten ist natürlich die erreichbare Genauigkeit. Durch das Verfahren an sich bedingte, prinzipielle Ungenauigkeitsquellen lassen sich bei NIEM (1997) nachlesen Da das Volumenschnittverfahren bei der Pflanzenvermessung aufgrund seines enormen Resourcenbedarfs nur in seltenen Fällen komplett berechnete 3D-Modelle lieferte, können allerdings nur allgemeine Aussagen zur Genauigkeit im konkreten Einsatz bei der Pflanzenvermessung gemacht werden.

Die Herstellerfirma gibt die Messgenauigkeit ihres Systems auf 0,5% des vermessenen Raumes an, dieser Wert ist bezogen auf den Einsatz mit der normalerweise mitgelieferten, niedrig auflösenden

digitalen Videokamera. Wie bereits angesprochen, ließen die Resultate der Messungen allerdings keine eigene statistische Analyse der Messgenauigkeit zu. Insbesondere zur Genauigkeit der Volumen- und Oberflächenmessungen kann deswegen keine Aussage gemacht werden. Bei Messversuchen an einfachen, regelmäßig geformten, künstlichen Objekten erfüllte das Verfahren zwar die Angaben des Herstellers vollständig, allerdings lassen sich daraus keine Schlüsse auf die Genauigkeit bei der Pflanzenmessung ziehen. Aus den Volumenangaben in Abbildung 21a (rechts) lässt sich bereits deutlich erkennen, dass gerade bei konkaven Objekten wie Blättern offensichtlich deutliche Überschätzungen des Volumens auftreten, was auch nicht überraschend ist, da die Wölbung fotografisch nicht als Silhouette erfasst werden kann.

Um zumindest annähernde Aussagen zur Genauigkeit bei Längenmessungen machen zu können, wurden von den in Abschnitt III.2.1.1 genannten Probepflanzen 70 Baumsegmente aus den jeweiligen Haupttrieben von Verzweigungspunkt zu Verzweigungspunkt (beziehungsweise Triebspitze) mit *ScanWare* / *Microstation* erfasst und gemessen. Diese Messergebnisse wurden dann den Resultaten der manuellen Messung gegenübergestellt. Die Vorgehensweise entspricht dabei der auch bei der Mehrbildtriangulation gewählten Vorgehensweise. Auf die dort angeführten Erläuterungen (Abschnitt III.3.3.2.2) sei deswegen an dieser Stelle hingewiesen, insbesondere die Fragestellung, inwieweit die manuelle Messung überhaupt als genau und daher als Referenz anzusehen ist. Aufgrund der geringen Anzahl gelungener Messungen sind die erhobenen Werte auch nicht generell aussagekräftig. Abbildung 22 kann nur eine ungefähre Vorstellung geben.

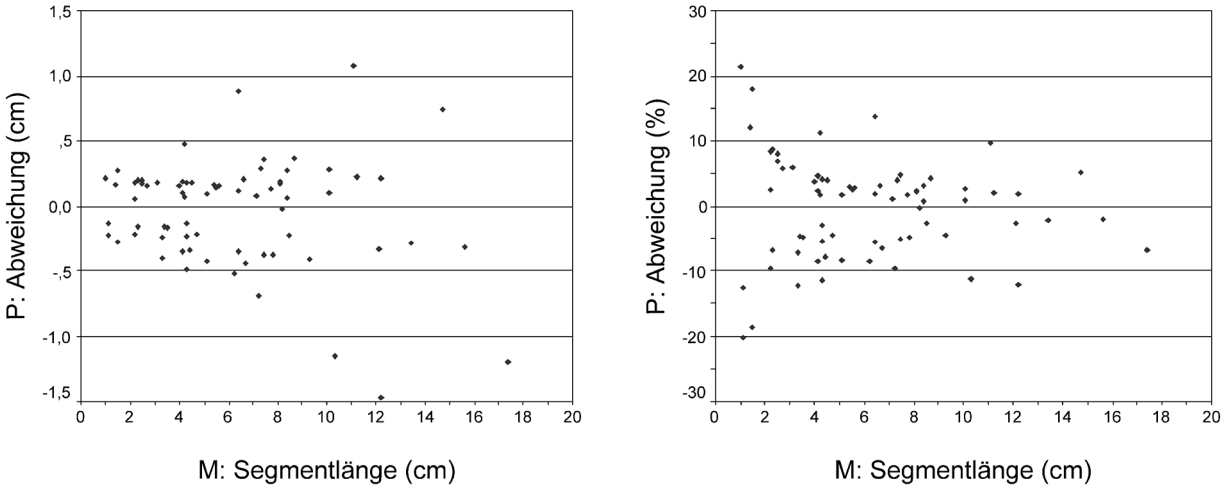

Abbildung 22: Absolute und relative Abweichung der photogrammmetrisch mit *ScanWare* erhobenen und mittels *Bentley Microstation* berechneten Segmentlängen (Ordinate, P) von den händisch gemessenen Werten (Abszisse, M).

Erkennbar ist, dass bei zunehmender Länge der untersuchten Wachstumseinheit zwar die absoluten Schwankungen kaum variieren, die relativen Abweichungen der photogrammmetrischen Messung aber immer geringer werden. Dies erklärt sich insbesondere mit den Ungenauigkeiten bei der manuellen Messung (Festlegung von Anfang und Ende des zu messenden Zweigabschnittes), welche bei zunehmender Segmentlänge prozentual immer weniger ins Gewicht fallen. Ohne aufgrund der unzureichenden Anzahl an Messungen weitergehende konkrete Aussagen treffen zu können, sind die Ergebnisse bezüglich der Messgenauigkeit doch als durchaus vielversprechend zu beurteilen.

Auf weitere Untersuchungen zur Genauigkeit der Winkelmessung wurde verzichtet: Es ist ohnehin zu erwarten, dass hier, in Anbetracht der Probleme, mit denen in diesem Fall eine genaue manuelle Messung verbunden ist, die photogrammmetrische Messung definitiv die exakteren Werte liefert.

2.3 Schlussfolgerungen

Der Volumenschnitt ist ein technisch sehr interessantes Verfahren zur räumlichen Vermessung von Objekten. Allerdings hat sich bei den durchgeführten Untersuchungen deutlich herausgestellt, dass bei einer wissenschaftlichen Ansprüchen genügenden Erfassung von Baumpflanzen die gegenwärtig verfügbare Hard- und Software überfordert ist. Dies gilt insbesondere deswegen, weil für die Pflanzenerfassung die Verwendung deutlich höherer Auflösungsstufen erforderlich ist als für die meisten anderen Objekte, für die das Verfahren eigentlich ausgelegt ist.

Eventuell wären bereits beim Einsatz spezialisierterer Systeme (wie entsprechend teuren *SGI*-Grafik-Workstations), für die *ScanWare* ebenfalls erhältlich ist, bessere Ergebnisse erzielbar gewesen. Dies konnte im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht überprüft werden. Da aber aufgrund des technischen Fortschrittes im Hard- und Softwarebereich die Wahrscheinlichkeit besteht, dass das Problem der unzureichenden Leistungsfähigkeit konventioneller Computersysteme bald überwunden wird, wurde der Volumenschnitt im Rahmen der vorliegenden Studie dennoch ausführlich vorgestellt.

Zwei Entwicklungen sind es, welche es, neben der Verfügbarkeit leistungsfähiger Computer, ratsam erscheinen lassen, den Silhouettenschnitt als potentielle Messlösung für Pflanzen im Auge zu behalten: Zum einen hat bereits NIEM (1999) dargestellt, dass eine Umkehrung des Prinzips „fixer Kamerastandort - drehbares Messobjekt“, so wie das Verfahren vorgehend beschrieben wurde, durchaus technisch möglich ist: Er schlägt hierzu die Verwendung eines Kalibrierrings rund um das Messobjekt vor, damit die in diesem Fall für jede Aufnahme getrennt notwendige Kalibrierung auf diesem Weg erfolgen kann. Bei praktischer Umsetzung dieser Erwägungen würde auch ein Freilandeinsatz - einen geeigneten einfarbigen Hintergrund vorausgesetzt - in greifbare Nähe rücken. Da zudem der Drehteller, das kostspieligste Element des Messsystems, überflüssig würde, wären auch finanzielle Vorteile denkbar. Durch den Einsatz eines derartigen Kalibrierrings könnte der Messende zudem noch situationsabhängig die günstigsten Aufnahmepositionen mit der besten Einsicht ins Objekt wählen.

Ein weiterer Aspekt ist eine Verbesserung des momentan gängigen Verfahrens, welche in aktuellen Softwareversionen auch schon in dieser Form umgesetzt wurde: Es handelt sich dabei um die Möglichkeit, den Anstellwinkel der Kamera relativ zum Drehteller in begrenztem Umfang auch innerhalb einer Messsession zu variieren. Es handelt sich dabei im Prinzip um mehrere Wiederholungen des beschriebenen Scandurchgangs an ein und demselben Objekt, allerdings mit geänderter Kameraposition (Höhe), wobei die einzelnen Durchgänge anschließend zu einem Messprojekt zusammengefasst werden. Dies ermöglicht es, bessere und mehr Silhouetten aus verschiedenen Perspektiven aufzunehmen, ein für das komplexe Messobjekt „Pflanze“ immer anstrebenswerter Aspekt. In gewissen Umfang ließe sich dadurch auch das Problem der Überschätzung konkaver und konvexer Volumina lindern.

Die aufgeführten Optionen sind allerdings momentan noch nicht vollständig verfügbar, eine Implementation ist auch noch nicht absehbar. Um dennoch ein auch mit aktueller Technik preiswert und effektiv einsetzbares Verfahren entwickeln zu können, wurden die Untersuchungen zum Silhouettenschnitt zunächst eingestellt. Die weiteren Forschungen im Rahmen des Projektes konzentrierten sich deswegen auf das in den folgenden Abschnitten beschriebene Verfahren der photogrammmetrischen Mehrbildtriangulation.

3 Untersuchungen zur Mehrbildtriangulation

Obwohl der Volumenschnitt in der Theorie die umfassende und dabei weitgehend automatisierte Erhebung räumlicher Daten von Baumpflanzen ermöglicht, stehen der sinnvollen praktischen Anwendung noch die enormen Anforderungen an die Rechnerkapazität entgegen. Mit der Mehrbildtriangulation existiert allerdings eine weitere photogrammmetrische Methode mit deutlich geringeren Anforderungen an die Computerausstattung. Zwar dient diese Methode weniger der Erfassung von Volumendaten als der Vermessung von Strukturdaten, sie ist aber dennoch gut als praxisnahes Verfahren zur Pflanzenvermessung denkbar. Dies zeigten bereits die Vorüberlegungen in Abschnitt II. 2.2.6.5. Auf den folgenden Seiten soll daher dieses Verfahren im Detail vorgestellt und eine entsprechende Mess- und Auswertemethodik für Baumpflanzen entwickelt werden.

3.1 Material und Methoden

3.1.1 Pflanzenmaterial und händische Vergleichsmessung

Auch für die Mehrbildtriangulation wurden, analog zum Silhouettenschnitt, als Referenz händische Messungen an den Versuchspflanzen durchgeführt. Der Schwerpunkt wurde dabei auf Buchen im Winterzustand gelegt. Als Messobjekte dienten 20 getopfte Pflanzen von etwa 20 Zentimeter bis knapp einem Meter Höhe. Um die Eignung des Verfahrens auch für den Einsatz im Freien zu testen, wurden zusätzlich auch fünf freistehende Buchen aus Freilandaufnahmen vermessen. Weiterhin wurden fünf Fichten erfasst, um die prinzipielle Tauglichkeit des Verfahrens für andere Baumarten zu prüfen.

Bei 17 der Buchen wurde mittels angelegtem Maßband die Länge jedes einzelnen Segmentes erfasst, bei den anderen lediglich die Gesamtlängen des Haupttriebes sowie der Seitenäste erster Ordnung. Weiterhin wurde die Trockenbiomasse bestimmt. Die Pflanzen wurden dazu mindestens drei Tage bei 65° in Trockenschränken behandelt. Bei den einzelsegmentweise vermessenen Buchen wurde anschließend auch jedes einzelne Segment auf Milligramm genau gewogen, ansonsten wiederum nur die Haupt- und Seitentriebe als Ganzes.

Durchmesser wurden mit einer Schublehre auf 0,1 Millimeter genau aufgenommen, es wurden dazu zwei um 90° versetzte Messungen gemittelt. Derart vermessen wurden Sprossbasisdurchmesser (drei Zentimeter über dem Boden), Mittendurchmesser des Haupttriebes sowie Astbasisdurchmesser der Seitenäste. Für Vergleichszwecke wurde bei einem Teil der Messpflanzen der Mittendurchmesser jedes Segmentes der Hauptachse ebenfalls gemessen.

3.1.2 Methodik der photogrammmetrischen Aufnahme

3.1.2.1 Fotografische Ausrüstung

Für die Mehrbildtriangulation kam eine ähnliche Kamera-Ausrüstung wie beim vorangehend beschriebenen Silhouettenschnitt zum Einsatz, nämlich die *Digital Science DC 265* der Firma *Kodak* (Abbildung 23). Es handelt sich dabei um das Nachfolgemodell der beim Volumenschnitt eingesetzten *DC 260.* Bei den Verbesserungen gegenüber der älteren Modellausführung handelt es sich um kleinere Details. Theoretisch wäre in diesem Fall, anders als beim Silhouettenschnitt, der Einsatz einer analogen Kamera denkbar. Die dabei auftretenden Schwierigkeiten und Zeitverzögerungen machen jedoch auch hier den Einsatz digitaler Technologie sinnvoll. Tabelle 8 gibt einen Überblick

über die für den Einsatz als Messkamera relevanten Daten, genauere Informationen können auf den Internetseiten des Herstellers [6] abgerufen werden.

Tabelle 8: Technische Daten der für die Messungen verwendeten Digitalkamera *Kodak Digital Science DC 265.*

Technische Daten	Kodak DC 265
Auflösung des CCD-Chips	1.548 x 1.032 Pixel
Mögliche Bildformate	768 x 512, 1.152 x 768, 1.536 x 1.024 Pixel
Objektiv	Dreifach-Zoomobjektiv mit abschaltbarem Autofokus, zusätzlich zweifach interpolierender digitaler Zoom[14]
Brennweite	8 - 24 mm (dies entspricht etwa 38-115 mm bei einer analogen Kleinbildkamera)
Schärfebereich	0,3 m - ∞
Verschlusszeit	¼ - 1/400 Sekunden
Belichtung	Automatisch oder manuell einstellbar
ISO-Entsprechung	100
Verbindung zum Computer	Verbindung zu *Windows*-PC oder *Macintosh* über USB, RS232C oder IrDA (Infrarot)
Ansteuerung durch den Computer	Eigenes Kamerabetriebssystem mit Skriptsprache *Digita* zur direkten Ansteuerung und Programmierung der Kamera vom Computer aus
Firmware-Versionen	1.0.1 und 1.0.4

Es handelt sich somit bei der *Kodak DC 265*, wie schon beim Vorgängermodell *DC 260*, nicht um eine spezielle photogrammmetrische Messkamera, sondern um eine konventionelle Ausführung, welche zur Zeitpunkt der Anschaffung (1999) von Leistungsfähigkeit und Funktionsumfang her in die gehobene Consumerklasse einzustufen war. Im Rahmen des vorgesehenen Messverfahrens ist allerdings, wie noch erläutert werden wird, ohnehin eine nachträgliche Kalibrierung gemäß des „inverse camera"-Verfahrens vorgesehen, so dass die fehlende Auslegung auf photogrammmetrische Belange in einem für den geplanten Einsatzbereich ausreichenden Maße kompensiert wird. Die theoretisch erreichbare Genauigkeit ist unter diesen Umständen, wie es auch an den Messergebnissen (siehe Abschnitt III.3.3) zu sehen ist, für viele Anwendungsfälle durchaus ausreichend.

Abbildung 23: Produktfoto der verwendeten Digitalkamera *Kodak DC 265*

Sämtliche Automatikfunktionen, welche die Kamera- und damit auch Messgenauigkeit negativ beeinflussen könnten (MEYER und BLEUL, 2001), sind zudem direkt oder durch die direkte Programmie-

14 Bei den interpolierten Zoomeinstellungen wird keine echte höhere Detailtiefe erreicht, die zusätzlichen Bildinformationen werden lediglich errechnet. Für photogrammmetrische Aufgabenstellungen ist dies nach Möglichkeit zu vermeiden.

rung mit der eingebauten Skriptsprache modifizierbar. Gleiches gilt für das Speicherformat der Grafiken. Letzteres ist wichtig, um die Verwendung eines verlustfreien Bildformates zu ermöglichen, damit nicht zusätzliche Ungenauigkeiten in den Messvorgang eingebracht werden. Wie die meisten anderen Fabrikate auch verwendet die *DC 265* nämlich per Voreinstellung das JPEG-Format, welches je nach eingestellter Kompression für photogrammmetrische Belange wenig geeignet ist.

Als weiteres nützliches, aber nicht unbedingt notwendiges, Zubehör für die Fotografien wurden ähnliche Utensilien wie auch bei den Untersuchungen zum Silhouettenschnitt verwendet. Zum einen erwies sich ein Stativ zur Fixierung der Kameraposition als nützliches Zubehör, allerdings wesentlich weniger essentiell als beim Silhouettenschnitt, wo eine feste Kameraposition Vorbedingung ist. Weiterhin musste bei den Aufnahmen im Gebäudeinneren für eine ausreichende Ausleuchtung gesorgt werden. Um die benötigte farbneutrale Beleuchtung zu erreichen, reicht für die Zwecke der Pflanzenvermessung der Einsatz von preiswerten Halogenstrahlern, wie sie oft auch auf Baustellen eingesetzt werden, völlig aus (SEETZEN, 2001).

Um einen kontrastierenden Hintergrund zu erhalten, wurde auf eine handelsübliche weiße Dia-Leinwand zurückgegriffen, welche zudem eine spezielle, leicht reflektierende Beschichtung aufweist. Bei Einsatz des Kamerablitzes führt dies zu einer deutlichen Absetzung des hellen Hintergrundes vom dunklen Messobjekt. Für Aufnahmen im Freien reicht aber auch ein weißes Laken aus.

3.1.2.2 EDV-Ausstattung

a) Computersystem

Die Untersuchungen zur Mehrbildtriangulation fanden unter Verwendung derselben Computer-Hardware wie auch schon beim beim Silhouettenschnitt statt (Standard-PC, Pentium II 450 Mhz, 128 MB RAM). Als Betriebssystem kam vorwiegend *Windows 2000* zum Einsatz, da insbesondere die Photogrammmetriesoftware diese Betriebssystemfamilie voraussetzt. Die Programmiertätigkeiten wurden zusätzlich unter *Linux* (Distribution *SuSE 7.x*) durchgeführt, weil hier leistungsfähigere Entwicklungsumgebungen frei zur Verfügung stehen.

b) Photogrammmetrie-, CAD- und Grafiksoftware

Für photogrammmetrische Standardaufgaben kam das Softwarepaket *Photomodeler Pro* der Firma *Eos Systems* zum Einsatz (Internet: [8]). Die ersten Vorversuche erfolgten dabei mit den Programmversionen 3.0 und 3.1, für die konkreten Messungen konnte dann bereits die Version 4.0 mit vielen Erweiterungen und Arbeitserleichterungen für den praktischen Einsatz verwendet werden. Schon vor dem eigentlichen Erscheinen dieser Programmversion stellte der Hersteller dankenswerterweise Beta-Versionen von *Photomodeler Pro 4* speziell für die Untersuchungen zur Verfügung. Anregungen für Verbesserungen und Fehlerberichte, die im Rahmen der Pflanzenvermessung anfielen, wurden von *Eos Systems* teilweise in die neueren Programmversionen integriert. Die folgenden Bemerkungen beziehen sich, sofern nicht anders erwähnt, alle auf die zum Zeitpunkt der Abfassung aktuelle Programmrevision 4.0f.

Das Programm ist, insbesondere für den Einsatz in Forschung in Lehre, zu einem sehr günstigen Preis erhältlich. Gerade im Vergleich zu photogrammmetrischer Profisoftware mit nicht wesentlich umfassenderem Leistungsspektrum ist dies als großer Vorteil zu werten (siehe dazu Abschnitt II. 2.2.6.5).

Eine erste Auswertung der erhaltenen Daten wurde zunächst mit Standard-CAD-Software vorgenommen. Die dabei zum Einsatz kommenden Programmpakete *Bentley Microstation SE*, *Autodesk VoloView Express* und *Actify 3DView* wurden schon im vorangehenden Kapitel bei der Beschreibung des Volumenschnitts vorgestellt.

c) Software zur Programmentwicklung

Über den Einsatz von Standardsoftware hinaus war es zusätzlich notwendig, eigene Softwareroutinen zur Datenauswertung zu entwickeln. Die im vorangehenden Abschnitt angesprochenen CAD-Programme bieten zwar einen umfassenden Funktionsumfang, für die komplexen Bedürfnisse einer Vermessung und Analyse vom Baumpflanzen erwiesen sie sich aber als nicht ausreichend effizient. Insbesondere mussten Programmfunktionen erstellt werden, die eine weitgehend automatische Erledigung von Routinemessvorgängen erlauben. Die Softwareentwicklung hierfür wurde in der verbreiteten Programmiersprache C vorgenommen. Ausschlaggebend für diese Entscheidung waren, neben entsprechenden Vorkenntnissen, insbesondere die folgenden Charakteristika dieser Programmiersprache:

- Funktionen wie `fprintf()` und `fscanf()` ermöglichen den einfachen Umgang mit formatierten Listen aus ASCII-Zeichen (`*.TXT`-Format oder insbesondere `*.CSV`[15]-Format für Tabellen). Derartige Listen können von den meisten Programmen (*MS Excel*, *StarOffice*, *SPSS* etc.) problemlos importiert und exportiert werden, insbesondere aber verwendet *Photomodeler Pro* dieses Format, um diverse Listen von erfassten 3D-Daten zu exportieren. Dadurch ist Datenkompatibilität in jeder Richtung zwischen der eigenentwickelten Software und Standardsoftware „von der Stange“ gegeben.

- Da C sehr weit verbreitet ist, sind, gerade im Grafikbereich, viele beispielhafte Implementationen von diversen Algorithmen in dieser Programmiersprache verfügbar. Dies vereinfacht oftmals die Lösung eigener Programmierprobleme.

Als Implementierung der Programmiersprache C wurde dabei unter *Linux* der C/C++-Compiler *GCC* der *Free Software Foundation* verwendet. Unter *Windows* steht mit dem ebenfalls frei verfügbaren *MinGW* („Minimalist GNU-System for Windows“, siehe [12]) eine kompatible Programmierumgebung zur Verfügung. Es handelt sich hierbei um eine Portierung des *GCC* sowie einiger für die Programmentwicklung wesentlicher *Unix*-Tools und Systembibliotheken. Auch unter Rechnern mit einem Betriebssystem aus der *MS Windows*-Familie wird dadurch eine *Unix*-ähnliche, POSIX-kompatible Umgebung für die Softwareentwicklung zur Verfügung gestellt. Damit sind die mit *MinGW* entwickelten Programme, sofern keine weitergehenden Betriebssystemfunktionen aufgerufen werden, vollständig konform zum ANSI-C-Standard (HEROLD, 1996) und ohne Probleme sowohl unter *Unix*- als auch *Windows*-Plattformen kompilierbar. Dadurch war es möglich, die Programmentwicklung von unter *Windows* lauffähigen Programmen auch unter *Linux* vorzunehmen.

15 CSV: „Comma Separated Values“, Dateiformat, bei dem die Inhalte einer Tabelle (zum Beispiel aus *MS Excel*) als Textdatei mit durch Kommata (oder ähnliche Trennzeichen) getrennten Werten im ASCII-Format abgespeichert werden.

3.1.2.3 Vorgehensweise bei der Pflanzenvermessung

a) Aufstellung für die Vermessung

Gewöhnlicherweise werden für photogrammmetrische Messungen, wie bereits dargelegt, spezielle, kalibrierte Messkameras verwendet. Für den vorliegenden Einsatzbereich erscheint diese Alternative als ungeeignet, da insbesondere auch die Zielsetzung verfolgt wird, ein Messverfahren zu entwickeln, dass mit handelsüblicher, preiswerter Hardware durchführbar ist. Da die verwendete Kamera in diesem Fall ohnehin nachträglich kalibriert werden muss, bietet es sich an, diese Herstellung der inneren und äußeren Orientierung erst nach den Aufnahmen, in Form des „inverse camera"-Verfahrens, vorzunehmen.

Die Vorgehensweise zur Kalibrierung von Nicht-Messkameras wurde in prinzipiell ähnlicher Form schon bei der Erklärung des Silhouettenschnittes vorgestellt: Bei diesem Verfahren wird ebenfalls die innere und relative äußere Orientierung der Kamera am Beginn jeder Messsession wiederhergestellt. Im Falle der photogrammmetrischen Triangulation bietet das „inverse camera"-Verfahren zusätzlich den Vorteil, dass die Kameraposition relativ zum Messobjekt für jedes einzelne Foto völlig frei wählbar ist, bei Bedarf können in einem Messdurchgang auch unterschiedliche Zoomeinstellungen gewählt werden. Sogar das abwechselnde Verwenden von Aufnahmen im Hoch- und Querformat ist kein Problem, ebenso wie der Einsatz gänzlich unterschiedlicher Kameramodelle - es können sogar konventionell kalibrierte und „inverse" Kameras gemischt werden. Man muss die Software in derartigen Fällen nur für diese Besonderheiten entsprechend einstellen.

Durch die Rückrechnung der Orientierung mittels inverser Kamera bieten sich somit zwei Optionen an, um Baumpflanzen zu vermessen: Zum einen ist das, wie vor allem bei unbeweglichen Messobjekten sinnvoll, die Verwendung unterschiedlicher Kamerapositionen. Andererseits kann, ähnlich wie schon beim Silhouettenschnitt beschrieben, eine fixe Aufnahmeposition beibehalten werden und der Anstellwinkel des Objektes geändert werden. Für das „inverse-camera"-Verfahren handelt es sich in beiden Fällen gleichermaßen lediglich um eine Änderung der relativen Ausrichtung von Aufnahmeobjekt und Kamera zueinander. Da ohnehin keine absolute äußere Orientierung nötig ist, reichen diese Ausgangsbedingungen vollkommen aus, die relative Positionierung zueinander kann problemlos zurückgerechnet werden.

Bei Pflanzen im Freiland bietet sich die Anwendung der ersten beschriebenen Variante an: Der Baum ist unbeweglich, um also die erforderliche vollständige Bildabdeckung auch bei Feldaufnahmen gewährleisten zu können, müssen aus unterschiedlichen, geeigneten Kamerapositionen Aufnahmen gemacht werden. Diese Methode ist auch bei getopften Pflanzen anwendbar, anderseits ist es gerade in dieser Messsituation oftmals einfacher, die Pflanze beweglich zu halten - zum Beispiel analog zum Silhouettenschnittverfahren mittels eines Drehtellers - und die Kamera auf einem Stativ zu fixieren. In Abbildung 24 werden beide Varianten dargestellt. Für die weitere Vorgehensweise spielt die Wahl der Aufnahmemethodik keine Rolle.

Abbildung 24: Alternative Messaufstellungen bei der Erfassung von Baumpflanzen. Links: Vermessung einer Pflanze im Freien. Rechts: Vermessung einer getopften Pflanze aus konstanter Kameraposition (Pflanze auf drehbarer Tisch-Plattform).

Allerdings benötigt man für dieses nachträgliches Kalibrieren der Kamera auf jedem Bild sogenannte Kontrollpunkte. Im Falle des Silhouettenschnittes werden die Kontrollpunkte für die Kalibrierung - noch vor der Durchführung der eigentlichen Messungen - durch ein zweidimensionales Kalibriermuster auf dem Drehteller, „pseudo-dreidimensional“ aufgenommen in mehreren, bekannten Drehwinkeln, gewährleistet. Da somit die Position der Punkte bekannt ist, kann durch den Rückwärtsschnitt bei der Triangulation die Kamera kalibriert werden.

Bei den Kontrollpunkten der Mehrbildtriangulation handelt es sich im Gegensatz dazu um signalisierte 3D-Punkte, deren räumliche Lage im Gegensatz zu den anderen, konventionellen Messpunkten bekannt ist. In der Auswahl derartiger Kontrollpunkte ist der Anwender ziemlich frei, im Optimalfall sollten sie allerdings den Raum um das zu messende Objekt eng und gleichmäßig umschließen. Je mehr Kontrollpunkte auf jedem einzelnen Bild zu sehen sind und desto besser diese im Raum verteilt sind, desto höher ist auch die erreichbare Genauigkeit. Allerdings steigt auch der Aufwand für die Markierung der Punkte, sowohl in der realen Messszenerie als auch anschließend in der photogrammmetrischen Auswertung, an.

Aus diesen Vorbedingungen ergibt es sich, dass eine Anordnung der Kontrollpunkte als Eckpunkte eines das Messobjekt umfassenden Quaders den besten Kompromiss aus erreichbarer Messgenauigkeit und Minimierung des Arbeitsaufwandes darstellen: Die acht Eckpunkte eines quadratischen Kalibriergestells begrenzen den das Objekt umgebenden Raum exakt, gleichzeitig aber beschränkt sich die Arbeit mit den Kontrollpunkten auf eben nur diese acht Punkte pro Projekt. Die Größe sollte maßstäblich an das Messobjekt angepasst gewählt werden. Da sich diese Art der Markierung von Kontrollpunkten als besonders geeignet darstellt, bietet *Photomodeler Pro* für diesen Spezialfall vereinfachte Funktionen an.

Die gemäß diesen Vorüberlegungen für die Vermessung von Baumpflanzen gewählte Messaufstellung ist aus Abbildung 24 ersichtlich: Zur Kalibrierung dient ein Kontrollgestell mit 70 cm Kantenlänge, wobei die unterschiedlich farbig markierten Eckpunkte als bekannte Passpunkte dienen und zur äußeren (als Bezugspunkte für das lokale Koordinatensystem) und inneren Orientierung der Kamera herangezogen werden können. Die signalisierten Punkte wurden dabei in Anlehnung an KRAUS (1996, S. 3ff) gestaltet. In dieser Konstellation umschließen sie, gut einsehbar und farblich unterscheidbar, gleichmäßig den Raum um das zu vermessende Objekt. Die 70 cm Kantenlänge für das Messgestell wurden als Kompromiss zwischen flexiblem Einsatz bei der Vermessung verschieden

großer Baumpflanzen und handlicher Transportfähigkeit (Türbreite) gewählt. Bei der Vermessung verwendet die Photogrammmetrie-Software nun, basierend auf den acht signalisierten Punkten, ein Koordinatensystem mit Ursprung in der Mitte des Messgestells, das heißt, den acht Kontrollpunkten werden die x-,y- und z-Koordinaten ±35,±35 und ±35 (Einheit Zentimeter) zugewiesen.

Wird zusätzlich mit Lampen zur Ausleuchtung und einer Dialeinwand als kontrastierendem Hintergrund gearbeitet, ist bei der Aufstellung auf eine Minimierung des Schattenwurfs zu achten, da dieser bei der Punktmarkierung stören kann (ansonsten aber nicht prinzipiell hinderlich ist).

b) Arbeitsschritte für die Erfassung

Fotografieren des Messobjektes

Als Grundlage für die spätere Vermessung dienen in 90°-Winkeln rund um das Messobjekt gemachte Bilder, also mindestens vier Fotos pro Messobjekt. In Abbildung 25 ist diese, eher als Minimal-Lösung zu betrachtende Aufnahmekonstellation schematisch dargestellt. Werden die Fotos auf die beschriebene Weise um 45° versetzt schräg zum Kalibriergestell gemacht, so sind jeweils sechs Kontrollpunkte pro Aufnahme einsehbar. Somit sind günstige Voraussetzungen für die spätere Kalibrierung gegeben.

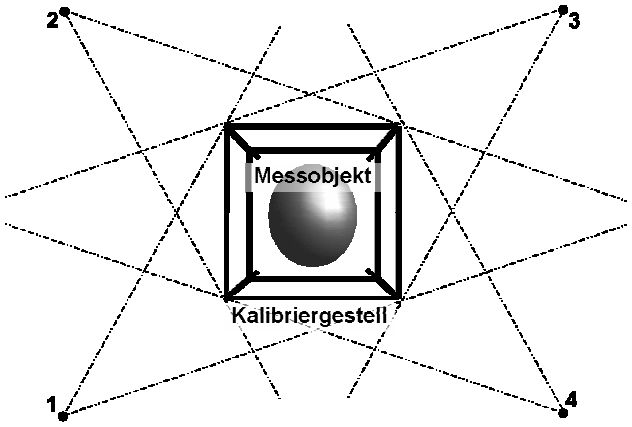

Abbildung 25: Prinzipdarstellung (Draufsicht) der Messaufstellung mit den vier Kamera-Positionen, welche für eine „Minimal-Aufnahme“ sinnvoll sind. Weitere Aufnahmepositionen liegen im Ermessen des Projektbearbeiters.

Es empfiehlt sich zudem, nicht nur bei komplexeren Pflanzenformen, zusätzliche Aufnahmen aus frei wählbaren Positionen zu machen, um einen besseren Einblick in die Baumstruktur zu erhalten. Die genaue Aufnahmeposition entscheidet der Durchführende vor Ort den Umständen entsprechend. Es sollten auf diesen zusätzlichen Fotos nach Möglichkeit mindestens vier Kontrollpunkte einsehbar sein, um auch sie von Anfang an mit in den „inverse camera“-Vorgang einbeziehen zu können. Ist diese Vorbedingung nicht gegeben, müssen auf den Fotos erst zusätzliche Objektpunkte gekennzeichnet und referenziert werden, um auch sie orientieren zu können. In diesem Fall dienen dann bereits berechnete und damit ebenfalls räumlich bekannte Objektpunkte als Kontrollpunkte für die Kalibrierung. Dies ist etwas ungenauer als die Verwendung der eigentlich dafür vorgesehenen Kontrollpunkte, da diese berechneten „Ersatz-Kontrollpunkte“ naturgemäß nicht so genau sein können wie die definiert vorgegebenen.

Als Grundregel gilt es, so viele Aufnahmen wie möglich zu machen, davon allerdings nur so viele wie unbedingt notwendig zu verwenden (EOS SYSTEMS, 2000). Durch den Einsatz digitaler Kameratechnik ist dies auch ohne Einschränkungen möglich, die zusätzlichen Bilder verursachen keine Mehrkosten und können problemlos archiviert oder auch gelöscht werden. Stellt man hingegen erst bei der Auswertung fest, dass man gewisse Punkte auf keinem der vorhandenen Fotos einsehen kann, können auch keine Messfotos mehr nachträglich aufgenommen werden. Die Erfahrung hat gezeigt, dass bei entsprechender Sorgfalt bei der Wahl geeigneter Aufnahmepositionen meist bereits vier bis maximal sechs ausgewählte Fotos vollkommen ausreichen.

Nach der Durchführung der Fotoaufnahmen sind die direkten Arbeiten am Objekt beendet. Alle weiteren Arbeitsschritte der Vermessung erfolgen am Computer. Daher kann zu diesem Zeitpunkt das Fotomaterial problemlos für eine spätere Verwendung archiviert werden. Im Gegensatz zum Speicherbedarf beim Silhouettenschnitt handelt es sich dabei um deutlich geringere Datenmengen.

Anlegen eines geeigneten Photomodeler Pro-Projektes

Dieser Punkt soll hier nur kurz angeschnitten werden, da es dabei im Wesentlichen lediglich darum geht, technische und administrative Grundeinstellungen für das Messprojekt zu tätigen. Dazu zählt die Angabe einer Maßeinheit für das Projekt und eine Schätzung zum ungefähren Ausmaß des Messraumes. Bei Verwendung des beschriebenen Kalibriergestells empfiehlt es sich, hier eine Projektdiagonale von circa einem Meter anzugeben.

Wichtig sind die Einstellungen für die verwendete Kamera: *Photomodeler Pro* muss wissen, dass eine nachträgliche Kalibrierung mittels „inverse camera“ erfolgen soll und dass es sich bei der Projektkamera um ein digitales Modell mit einer bestimmten Bildauflösung handelt. Zudem kann eine ungefähre Angabe der Brennweite zur Unterstützung der automatischen Kalibrierung vorgenommen werden. Dies ermöglicht es, schneller zu genauen Werten zu gelangen, da die Algorithmen zur Wiederherstellung der Orientierung bereits in den ersten Durchläufen mit realistischeren Ausgangsvoraussetzungen arbeiten können. Zahlreiche derartiger Angaben zur Kamera speichert die verwendete *Kodak DC 265* ohnehin als Zusatzinformationen im Digitalfoto mit ab, sofern das verwendete Format dies zulässt. Verwendet man beispielsweise das ansonsten allerdings weniger für photogrammmetrische Zwecke geeignete JPEG-Format, kann man den beigefügten Metadaten[16] zum Beispiel entnehmen, dass die „focal length“ als Parameter der eingesetzten Kamera 10,4 beträgt.

Markierung und Referenzieren der Kontrollpunkte

Mit dem Markieren und Referenzieren der Kontrollpunkte beginnt die eigentliche photogrammmetrische Auswertung der Fotos am Computer. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass die im Folgenden beschriebene Reihenfolge der einzelnen Verfahrensschritte nicht unbedingt zwingend ist. Es empfiehlt sich zwar, das Bearbeiten der Kontrollpunkte als grundlegende Tätigkeit allen anderen Arbeitsschritten voranzustellen, ansonsten sind jedoch auch andere Vorgehensweisen möglich. Gerade beim nachträglichen Einfügen von zusätzlichen Bildern in ein Messprojekt ist dies auch gar nicht anders möglich. Insbesondere die Arbeitsvorgänge Markierung von Messpunkten, Referenzieren, sowie Verbinden mit Geraden und/oder NURBS[17], welche im Folgenden aus Gründen der Übersicht getrennt voneinander dargestellt werden, werden

16 Unter Metadaten sind in die eigentlichen Bilddaten eingebettete Zusatzdaten mit weitergehenden Informationen (Aufnahmeentfernung, Kameraeinstellungen etc.) zu verstehen.

17 NURBS: Non-uniformal rational b-spline, Erklärung folgt später im Text.

bei zunehmender Erfahrung in der Methodik meist fließend ineinander übergehen. Nicht zuletzt ist die genaue Vorgehensweise auch von den persönlichen Vorlieben des Bearbeiters abhängig und je nach den Erfordernissen des Projektes flexibel anpassbar.

Zum Markieren der Kontrollpunkte gibt es, da diese in Würfelform angeordnet wurden, eine spezielle Funktion, bei der man nach Angabe der Größe des Gestells der Reihe nach auf jedem im Projekt vorhandenen Bild die jeweils einsehbaren Eckpunkte markiert. Da dadurch die Punktzuordnung schon vorgegeben ist, müssen die Kontrollpunkte nicht mehr referenziert werden. Vorsicht ist allerdings, insbesondere bei der Messvariante „stationäre Kamera - drehbares Messobjekt“, angebracht, um auf den einzelnen Bildern auch die wirklich zusammengehörigen Eckpunkte korrekt zu referenzieren. Eine entsprechende farbliche Kennzeichnung der signalisierten Punkte ist daher sinnvoll.

Nach dem Aufnehmen der Kontrollpunkte sollte man zum ersten Mal mit *Photomodeler Pro* das Messprojekt durchrechnen. Zum einen fallen dadurch grundsätzliche Fehler bei der Referenzierung gleich vorweg auf, zum anderen wird der Software dadurch die Orientierung der Fotos zueinander bekannt, wodurch für das weitere Vorgehen Hilfsfunktionen, wie zum Beispiel die bereits angesprochenen Epipolaren, zur Verfügung gestellt werden können. Aus diesen Gründen empfiehlt es sich, auch im weiteren Arbeitsverlauf das Messprojekt häufiger kalkulieren zu lassen, insbesondere, da dies nur mit einem vernachlässigbaren Zeitaufwand verbunden ist.

Markieren der Messpunkte

Ziel der Vermessung der Baumpflanzen soll, wie bereits beschrieben, eine Erfassung der Baumstruktur sein. Dazu wird, wie zum Beispiel auch bei GODIN et al. (1999) und ROOM et al. (1994) vorgeschlagen, die Pflanze in Wachstumseinheiten eingeteilt. Diese Wachstumseinheiten sind im vorliegenden Fall Ast- und Zweigsegmente sowie Knospen. Sie sind räumlich definiert durch ihre Anfangs- und Endpunkte. Das heißt, dreidimensional zu erfassen und daher zu markieren sind alle Verzweigungen sowie Trieb-, Ast- und Knospenspitzen. Somit werden als Messpunkte alle derartigen Punkte der Baumpflanze photogrammmetrisch eingemessen. Da dies insbesondere bei Buchen im Sommerzustand sehr schwer ist, wurde in diesem Fall die Vermessung im Winterzustand vorgenommen, ansonsten müssten auch noch Blätter als Wachstumseinheiten erfasst werden. Den angestrebten Überblick über die Baumarchitektur erhält man auf diese Weise am besten.

Die Triebspitzen sind dabei auf den Fotos eindeutig zu markieren. Problematischer ist die Vorgehensweise bei der Kennzeichnung der Verzweigungen: Der Messpunkt ist in diesem Fall nicht eindeutig definiert. Anzupeilen ist daher der Schnittpunkt der imaginären Achsen von Haupttrieb und Seitentrieb im Bereich der Verzweigung. Im Vergleich zur manuellen Messung ist aber festzustellen, dass dort dieses Problem noch viel deutlicher auftritt. Abbildung 26 stellt die Vorgehensweise der Messpunktmarkierung schematisch dar.

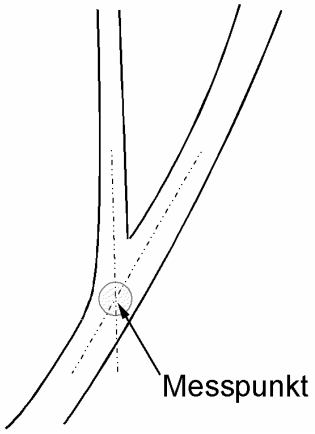

Abbildung 26: Prinzip der Markierung von Verzweigungen als Messpunkte für die photogrammmetrische Triangulation.

Referenzieren der Messpunkte

Noch sind die zu vermessenden Punkte auf allen zweidimensionalen Bildern unabhängig voneinander gekennzeichnet. Um aus diesen Informationen räumliche Daten zu gewinnen, müssen dem Programm einander entsprechende Punkte auf den unterschiedlichen Bildern mitgeteilt werden. Dieser Vorgang wird als Referenzieren bezeichnet. Ein zweidimensionaler Punkt muss dazu auf mindestens zwei Fotos erkennbar sein. Wenn ein im Quellfoto markierter Punkt auch im Zielfoto gekennzeichnet wird, können aufgrund der bekannten räumlichen Situationen, welche den Fotos jeweils zugrunde liegen, aus den jeweiligen 2D-Bildkoordinaten die lokalen 3D-Koordinaten trianguliert werden.

Sobald die Fotos zueinander orientiert sind, was durch das vorangehende Markieren der Kontrollpunkte in den meisten Fällen bereits gegeben ist, kann die Photogrammmetrie-Software den Bearbeiter beim Referenzieren durch die angesprochenen Hilfsfunktionen, an erster Stelle sind hier die Epipolaren zu nennen, unterstützen. Epipolaren sind Linien auf dem Zielfoto, entlang derer der aktuell zu referenzierende Punkt nach Einberechnung der bislang bekannten räumlichen Information liegen muss. Je nachdem, wie viele bekannte Eingangsparameter *Photomodeler Pro* zur Verfügung stehen, kann diese Linie auch ganz wegfallen und der Cursor springt direkt an die Stelle im Zielfoto, an der der Zielpunkt höchstwahrscheinlich liegt. Blind vertrauen sollte man diesen Hilfsfunktionen allerdings nicht, je nach Genauigkeit der bislang vorliegenden Punktmarkierungen und insbesondere bei eventuell auftretenden Fehlmarkierungen muss dieser Vorschlag nicht unbedingt korrekt sein.

Die Abbildungen 27a und 27b verdeutlichen den Vorgang der Referenzierung unter Anwendung einer Epipolarlinie. Das Quellfoto („source picture“, Abbildung 27a) und das Zielfoto („target picture“, Abbildung 27b) zeigen dabei die zu vermessende Baumpflanze aus unterschiedlichen Aufnahmewinkeln. Auf beiden Bildern sind die jeweils bereits zweidimensional markierten Messpunkte durch ein „x“ dargestellt. Zum Referenzieren wurde auf dem Quellfoto der 2D-Messpunkt mit der ID 502 angewählt. Im Zielfoto zeigt die von *Photomodeler Pro* berechnete Epipolare an, entlang welcher Line der diesem Punkt entsprechende 2D-Punkt auf diesem Bild liegen muss. Die korrekte Zuordnung der homologen Punkte ist durch diese Hilfestellung problemlos möglich. In Abbildung 27a sind einzelne Wachstumseinheiten bereits als Geraden markiert, dieser Verfahrensschritt wird in den folgenden Abschnitten erläutert.

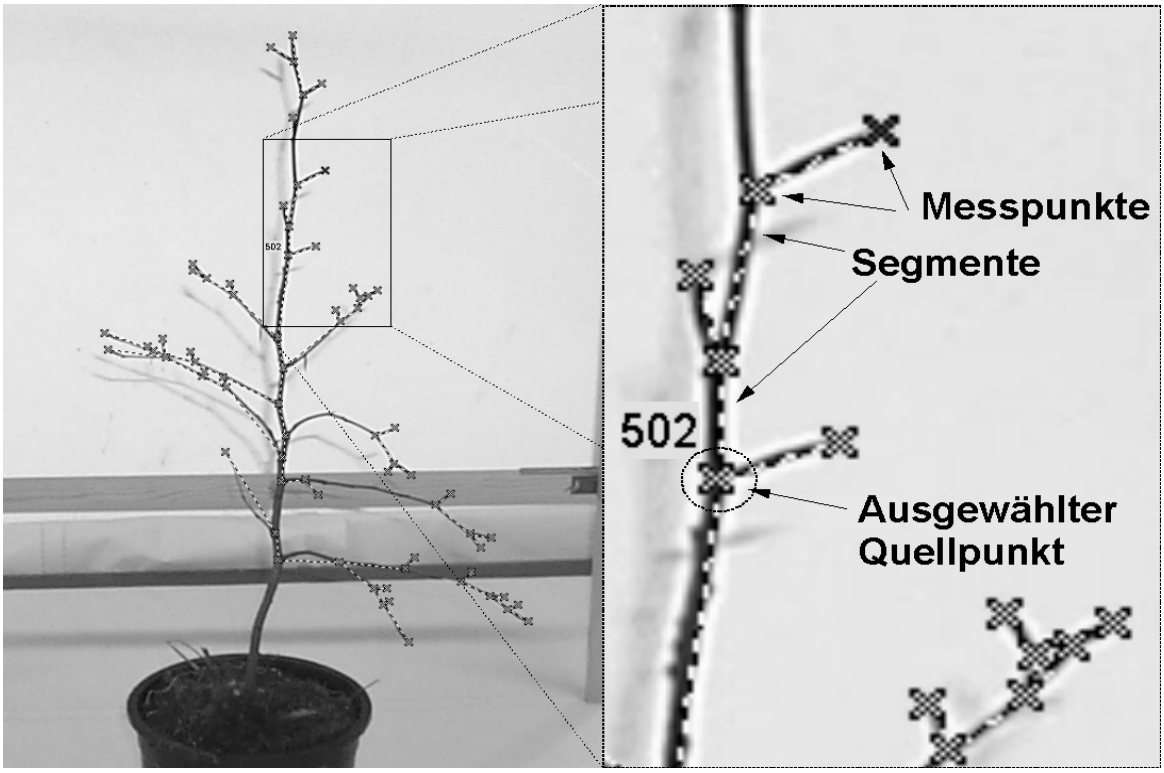

Abbildung 27a: Referenzieren einander entsprechender Bildpunkte mit *Photomodeler Pro*. Hier: Quellfoto mit ausgewähltem Quellpunkt (Punkt-ID 502). Rechtes Teilbild: Ausschnittsvergrößerung.

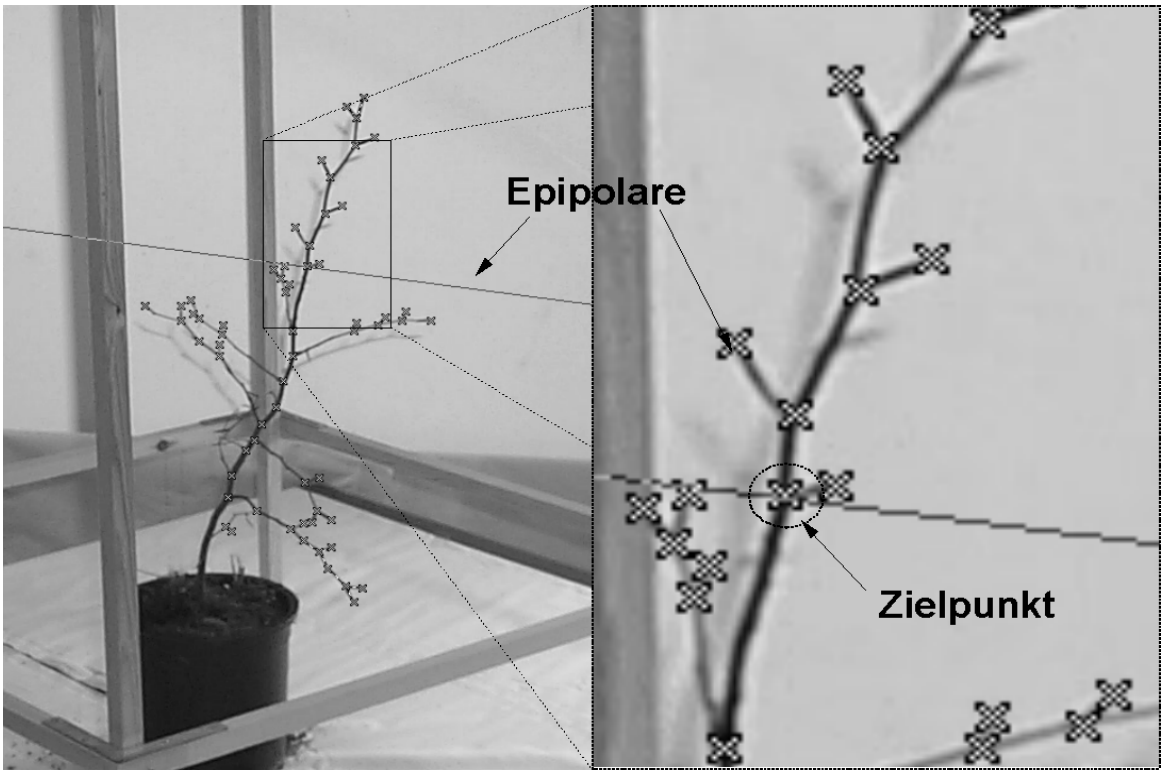

Abbildung 27b: Zielfoto mit Darstellung der photogrammmetrisch berechneten Epipolare und der wahrscheinlichen Lage des Zielpunktes. Rechtes Teilbild: Ausschnittsvergrößerung.

KRAUS (1996, S. 207) beschreibt diese Vorgehensweise der Referenzierung der Messpunkte allgemein. Die von ihm getroffene Feststellung, dass sich eine automatische Referenzierung für den Nahbereich in der Regel verbietet, erwies sich auch im Einsatz mit *Photomodeler Pro* als zutreffend: Zwar bietet diese Software unter gewissen Umständen, aufbauend auf den bereits erwähnten Hilfsfunktionen, auch eine vollautomatische Referenzierung an. Gerade bei den oftmals nahe zusammenliegenden Messpunkten der Pflanzen (Knospen!) zeigte es sich allerdings, dass trotzdem die manuelle Referenzierung - unter Hinzuziehung der automatisierten Hilfsfunktionen als Entscheidungshilfe - die beste Vorgehensweise darstellt. Würden hingegen nur wenigere, weiter auseinander liegende Punkte markiert werden, so stellt diese Automatikfunktion eine deutliche Erleichterung und Zeitersparnis dar.

Es sei an dieser Stelle am Rande angemerkt, dass die derart gemessenen Koordinaten, obwohl nun ebenfalls räumlich festgelegt, anders als beim Silhouettenschnitt nicht als Voxel bezeichnet werden dürfen. Eine 3D-Koordinate hat per Definition keine räumliche Ausdehnung, während ein Voxel einen von der jeweiligen Voxel-Auflösung abhängigen, quaderförmigen Ausschnitt des betrachteten 3D-Raumes darstellt.

Verbinden der Messpunkte durch Geraden

Die bisher vorliegenden Daten stellen lediglich die Koordinaten der einzelnen Triebspitzen respektive Verzweigungen dar. Um die Baumstruktur visualisieren zu können, ist es erforderlich, die Astsegmente im 3D-Modell durch geometrische Objekte darzustellen. Hierzu bieten sich zwei Alternativen an, die Verwendung von Geraden, wie im Folgenden erläutert, oder die im nächsten Abschnitt vorgestellte Verwendung von NURBS.

Geraden stellen dabei die einfachste Lösung zur Repräsentation von Wachstumseinheiten einer Pflanze in einem dreidimensionalen Modell dar. Da sie geometrisch einfach als die direkte Verbindung zwischen zwei räumlichen Punkten anzusehen sind, wofür es nur eine einzige Möglichkeit geben kann, sind sie als Vektor durch die Angabe von Anfangs- und Endpunkt eindeutig definiert. Außer der Festlegung dieser beiden Charakteristika, welche ihrerseits bereits durch die Referenzierung eindeutig im Raum festgelegt sind, ist kein weiterer Arbeitsschritt nötig. Werden zwei Punkte auf einem 2D-Bild in *Photomodeler Pro* durch eine Gerade verbunden, so ist diese Gerade auch sofort auf jedem anderen Bild vorhanden, auf dem diese beiden Punkte sonst noch auftauchen.

In der praktischen Anwendung empfiehlt es sich oftmals, anders als in der hier hier beschriebenen Reihenfolge der Vermessung, derartige Geraden möglichst früh festzulegen: Werden Punkte falsch zueinander referenziert, was bei dem komplexen Messobjekt durchaus vorkommen kann, fällt dies dem Bearbeiter durch die dann teilweise willkürlich im Raum laufenden Linien wesentlich schneller auf, als wenn man derartige grundlegende Fehler erst nachträglich einzelpunktweise suchen und korrigieren muss.

Verbinden der Messpunkte durch NURBS

Räumliche Geraden sind, wie im vorangehenden Abschnitt dargelegt, die einfachste Methode, um Astsegmente als Verbindungselemente zwischen den Messpunkten darzustellen. Allerdings geben diese Geraden den tatsächlichen Verlauf der oftmals gekrümmten Sprossabschnitte oft nur annähernd wieder. Viel besser eignen sich hierfür flexiblere Kurvenverläufe. Geeignete Elemente aus der Computergrafik, um derartige gekrümmte Verläufe (nicht nur bei Linien, sondern auch bei kompletten Oberflächen) darzustellen, sind zum einen Bezier-Kurven, vor allem aber die so-

genannten B-Splines. In beiden Fällen wird der Kurvenverlauf durch Kontrollpunkte - welche in diesem Zusammenhang nichts mit den gleichnamigen signalisierten Messpunkten in der Photogrammmetrie zu tun haben - in Teilabschnitte untergliedert. Diese einzelnen Teilabschnitte werden dabei so gewählt, dass der Streckenverlauf im jeweiligen Bereich durch angepasste mathematische Funktionsgraphen angenähert werden kann.

Von diesem Prinzip gibt es verschiedene Varianten und Implementationen, im Folgenden interessieren insbesondere die B-Splines in Form der „non-uniformal rational b-splines“ (NURBS). B-Splines haben gegenüber Bezier-Kurven den Vorteil, dass sie, insbesondere bei einer großen Anzahl von Kontrollpunkten, einfacher zu berechnen sind. Für die praktische Anwendung ist es zudem von Bedeutung, dass die Veränderung eines einzelnen Kontrollpunktes nur Auswirkungen auf den jeweils zugehörigen Kurventeilabschnitt hat und nicht global auf den gesamten Streckenverlauf. Bei den teilweise doch sehr komplexen Verläufen von Baumzweigen hat somit der Bediener durch die Verwendung von B-Splines bessere Möglichkeiten zur genauen Markierung als mit Bezier-Kurven.

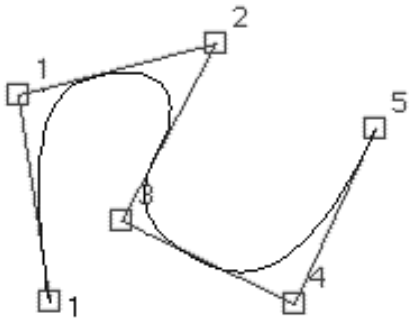

Abbildung 28: Prinzip der Darstellung eines gekrümmten Streckenverlaufs durch Annäherung mittels Splines.

Abbildung 28 zeigt die prinzipielle Vorgehensweise beispielhaft anhand von fünf Kontrollpunkten. Als Funktion werden für B-Splines meist Polynome vierten Grades (kubische Polynome) gewählt. Die Funktionen sind dabei nicht nur so zu wählen, dass sie die Objektform genau wiedergeben, sondern sie müssen auch stetig ineinander übergehen, das heißt, sie müssen im Übergangspunkt die gleiche Steigung aufweisen. Dieser Gesichtspunkt wird allerdings in der Regel von der verwendeten Software selbstständig gewährleistet. Nachzulesen sind Details zu Splines unter anderem auf den Internet-Seiten [19] und [20].

Photomodeler Pro bietet derartige NURBS standardmäßig als räumliche geometrische Elemente an. Im Gegensatz zu Geraden, die, wie bereits beschrieben, keine weitere Nachbearbeitung erfordern, müssen NURBS allerdings wieder referenziert werden. Der 3D-Kurvenverlauf kann aus einer einzelnen 2D-Perspektive nicht eindeutig räumlich festgelegt werden. Es greift also wieder die Regel, dass die einzelnen Segmente aus mindestens zwei verschiedenen Perspektiven als B-Splines markiert sein müssen, damit daraus ein räumlicher Kurvenverlauf errechnet werden kann. Allerdings gilt hier noch viel mehr als bei Einzelpunkten, dass eine Markierung auf zwei Fotos die absolute Untergrenze darstellt. Da es sich bei einer räumlichen Kurve um ein sehr komplexes Objekt handelt, schlägt im praktischen Einsatz die Referenzierung bei nur zwei Aufnahmeperspektiven oft fehl, beziehungsweise *Photomodeler Pro* berechnet falsche Kurvenverläufe. Eine Kennzeichnung auf mindestens drei, in günstigem Winkel zueinander liegenden Bildern ist daher unbedingt anzustreben.

Um das Resultat einer Baumvermessung mittels NURBS darzustellen, werden in Abbildung 29 drei Alternativen, ein und dasselbe Messprojekt (in diesem Fall eine Buchenpflanze) räumlich zu erfassen, gegenübergestellt: Für das linke Modell wurde dabei jedes einzelne Ast-/Zweigsegment erfasst, dann allerdings durch eine einfache Linie dargestellt. Beim mittleren und rechten Modell wurde hingegen ein vereinfachtes Verfahren gewählt: Nicht jedes einzelne Segment wurde erfasst, sondern lediglich die Hauptachse und die Seitenäste erster Ordnung als Ganzes. Dies bringt eine enorme Arbeitserleichterung mit sich, da deutlich weniger Punkte markiert und referenziert werden müssen. In derartigen Messszenarien kann auch auf die bereits angesprochenen automatischen Referenzierungsfunktionen zurückgegriffen werden. Allerdings müssen dann auch deutlich längere Abschnitte zwischen den einzelnen Messpunkten realitätsgetreu durch Geraden oder NURBS dargestellt werden.

Wie das mittlere Modell zeigt, ist dies beim Einsatz von B-Splines problemlos möglich, die 3D-Kurven können den Astverlauf sehr originalgetreu wiedergeben. Zum Vergleich dazu wurde im rechten Bild nur mit Linien gearbeitet. Im Gegensatz zur linken Teilabbildung,wo durch die vielen kleinen Liniensegmente die Astform im Endeffekt recht gut getroffen wird, liefert die Verwendung von Linien bei längeren Entfernungen keine zufrieden stellenden Ergebnisse. Aus diesen Erfahrungen ließe es sich schließen, dass die optimale Messvariante eine Kennzeichnung jedes einzelnen Segmentes mittels NURBS ist. Dies gestaltet sich allerdings in der Messpraxis als ziemlich schwierig, da jedes einzelne Zweigsegment mehrfach markiert und referenziert werden müsste, was bei den komplexen Baumstrukturen fast unmöglich ist.

Daher bieten sich zwei Alternativen für die Pflanzenvermessung an: Interessiert nur eine räumliche Analyse von Hauptachse und Seitenästen erster Ordnung, so werden diese mittels B-Splines eingemessen. Bei einer genauen, einzelsegmentweisen Vermessung hingegen muss aus praktischen Gründen eine Markierung der Astabschnitte mit Linien vorgezogen werden. Die Auswirkungen auf die zu erzielende Messgenauigkeit sind später in diesem Kapitel dargestellt.

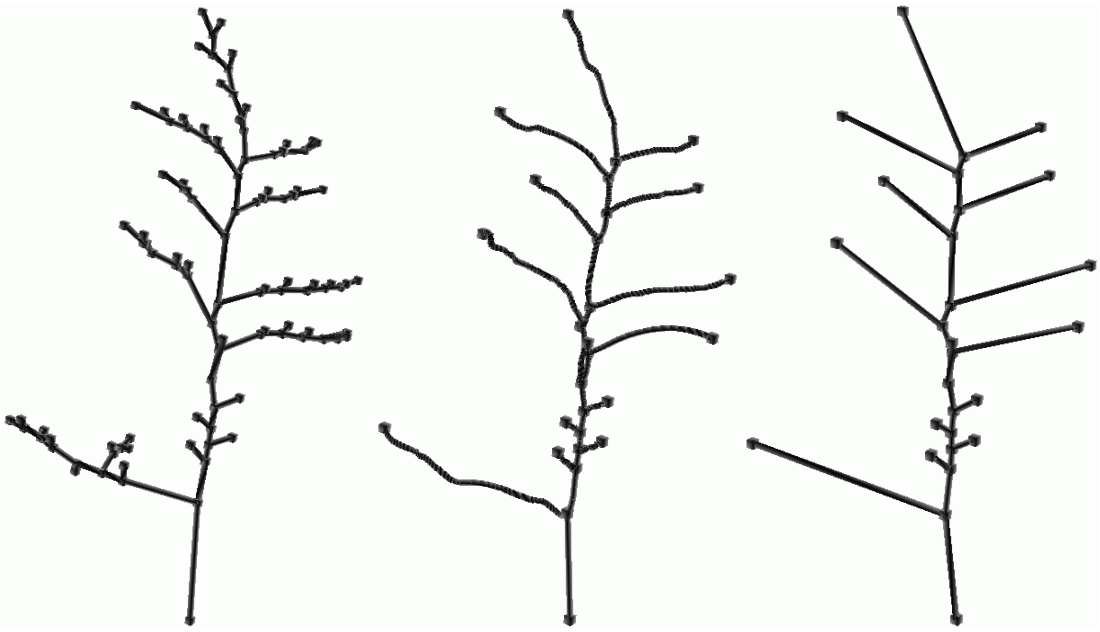

Abbildung 29: Verschiedene Alternativen zur Markierung von Astsegmenten am Beispiel der Messpflanze 10: Links: Alle Astsegmente, dargestellt als Geraden. Mitte: Astsegmente erster (Sprossachse) und zweiter Ordnung, dargestellt als NURBS. Rechts: Astsegmente erster und zweiter Ordnung, dargestellt als Geraden.

Messung von Durchmesserwerten

Prinzipbedingt ist die Mehrbildtriangulation für eine Erfassung von Körperdaten ein weniger geeignetes Verfahren. *Photomodeler Pro* stellt sich allerdings zumindest in Teilberechen als Ausnahme dar: Das Programm bietet die Möglichkeit, zylinderförmige räumliche Objekte photogrammmetrisch als komplette Körper exakt zu vermessen. Diese werden dabei ebenso wie Punkte und NURBS gehandhabt: Der gewünschte Zylinder muss auf mehreren Bildern markiert - wichtig sind hier jeweils die linke und die rechte Außenkante - und dann wie gewohnt referenziert werden. Gedacht ist diese Funktionalität, gemäß des typischen Einsatzzweckes derartiger Photogrammmetriesoftware, zur Vermessung von Industrieanlagen (Rohre) etc.

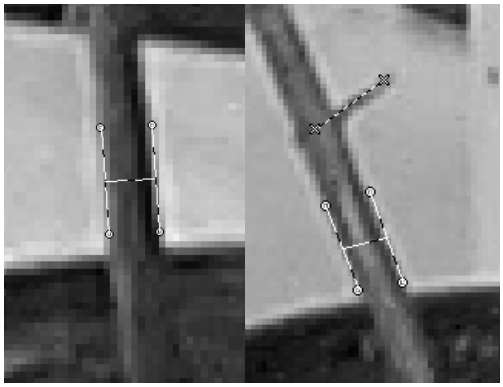

Abbildung 30: Markierung von Zylindern zur photogrammmetrischen Ermittlung des Durchmessers an Buchenpflanzen.

Im Falle der Baumvermessung bietet es sich an, diese Funktion für die Durchmesserermittlung heranzuziehen, wie dies in Abbildung 30 für eine Messung des Sprossdurchmessers dargestellt ist. Da sich dieser Aspekt auch leicht auf stehende Altbäume übertragen lässt, ist somit mittels dieser Zylinderfunktionen auch die Durchführung von Messungen an stehenden Stämmen denkbar.

3.2 Methodik der Datenauswertung

3.2.1 Datenauswertung mit handelsüblicher Software

Schon bei der teilweisen Auswertung der komplexen Volumenmodelle aus dem Silhouettenschnitt, wie in Abschnitt III.2.1.2.3 beschrieben, hat es sich gezeigt, dass aktuelle CAD-Software mit den im standardisierten DXF-Format vorliegenden räumlichen Daten von Baumpflanzen theoretisch gut umgehen kann. Da auch die für die Mehrbildtriangulation eingesetzte Software die erhaltenen 3D-Modelle zu jedem Zeitpunkt in verschiedenen gängigen Dateiformaten, darunter auch dem DXF-Format, exportieren kann, wurde für die ersten Auswertungen der Mehrbildtriangulation zunächst ebenfalls auf handelsübliche Grafiksoftware zurückgegriffen.

Prinzipiell lassen sich einzelne Strukturdaten sehr einfach erhalten, wie Abbildung 31 zeigt. Dargestellt wird hier das Vermessen der Länge einzelner Wachstumseinheiten, von Verzweigungswinkeln sowie einzelner Punktkoordinaten mit der Software *Actify 3DView*. Allerdings müssen hierbei alle Elemente, die vermessen werden sollen, auch einzeln gekennzeichnet werden. Wenn größere Zusammenhänge der Baumarchitektur erfasst werden sollen, kann sich dies als ziemlich aufwändig herausstellen. Zudem ist keine Zusammenfassung mehrerer Messschritte möglich, wie dies schon bei

einfachen Messarbeiten, zum Beispiel der Berechnung der Trieblänge durch Summieren der einzelnen Segmentlängen des Triebes, nötig wird. Somit ist der Einsatz handelsüblicher CAD-Software, obwohl prinzipiell sehr leistungsfähig, im speziellen Einsatzgebiet der Pflanzenvermessung nur von beschränktem Nutzen.

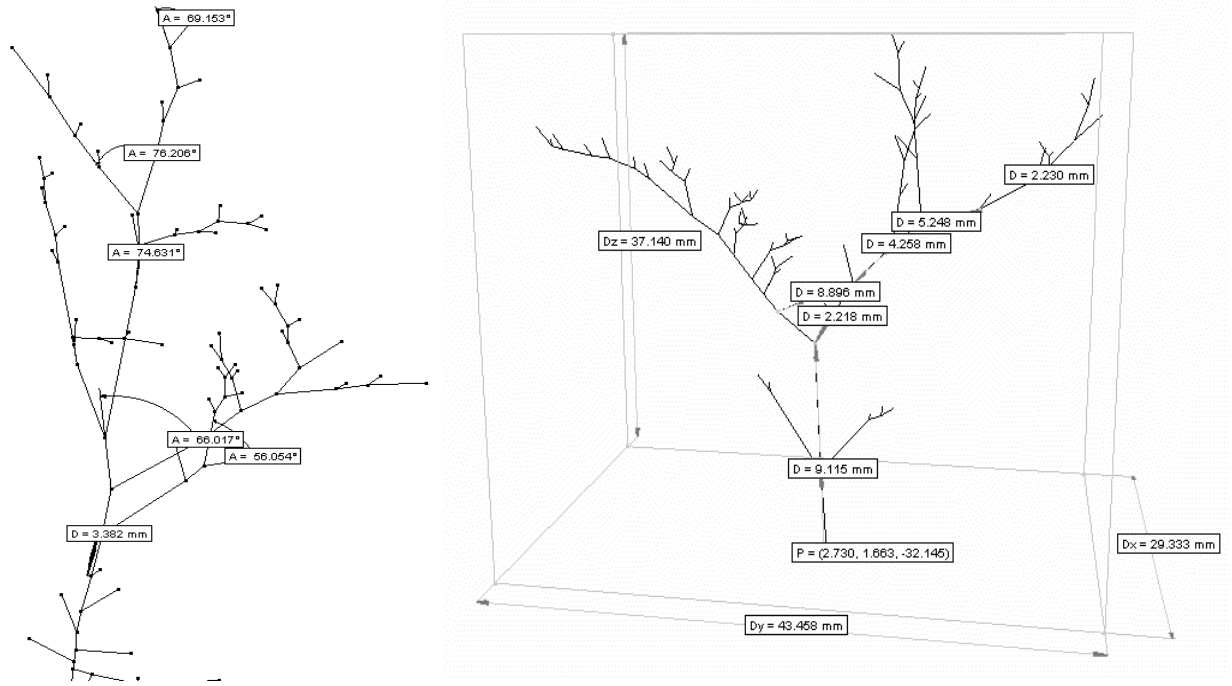

Abbildung 31: Darstellung von einfachen Messvorgängen (Segmentlängen: D=distance, Winkel: A=angle) an den 3D-Baummodellen (im Grafikprogramm verkleinert auf 1/10 der ursprünglichen Größe, daher Einheit Millimeter). Links: Messpflanze 19, rechts: Messpflanze 14.

Für die Auswertung der Daten im Rahmen des vorliegenden Projektes wurde daher vom Autor spezielle Software entwickelt. Im Falle einer Verwendung von NURBS und Zylinderformen hingegen muss aus technischen Gründen noch auf Standard-CAD-Software zurückgegriffen werden, da *Photomodeler Pro* die entsprechenden Messdaten nicht direkt für eine externe Weiterverwendung zur Verfügung stellt, sondern sie ausschließlich eingebettet im DXF-Format ausgibt.

3.2.2 Strukturanalyse mit speziell entwickelter Software

Die Daten zur Baumtopologie sind den Standard-Grafikprogrammen nicht bekannt und können dort deswegen nicht oder nur sehr umständlich in die entsprechenden Auswertungen mit einbezogen werden. Der Einsatz handelsüblicher Software zur Weiterverarbeitung der gemessenen 3D-Modelle ermöglicht also nur das Abgreifen einzelner geometrischer Informationen, nicht das Erfassen weitergehender Angaben zur Baumarchitektur. Um auch die topologischen Kennwerte mit einzubeziehen, war es daher erforderlich, eigene Software zu entwickeln.

Ziel bei der Erstellung der entsprechenden Routinen war es dabei im Rahmen des vorliegenden Projektes zunächst nicht, eine von der Benutzerfreundlichkeit her auf den Endbenutzer zugeschnittene Auswertesoftware zu erstellen. Vielmehr haben die erstellten Programmmodule eine grundsätzliche „proof-of-concept"-Funktion, um die entwickelten Algorithmen für die Auswertung zu verifizieren. Zudem sollten die grundsätzlichen Datenstrukturen für die 3D-Daten erprobt und auf ihre praktische Anwendbarkeit hin überprüft werden. Für die spätere konkrete praktische Anwendung ist es ohne

größere Probleme möglich, entsprechende grafische Benutzeroberflächen für die einzelnen Funktionen zu entwickeln.

Das im Anhang C im C-Quellcode abgedruckte Programm *PMAnalyse* ist das Resultat dieser Überlegungen. Eine Übersicht über Aufrufparameter und Funktionalität aller Programmbestandteile findet sich in Anhang A. In den folgenden Absätzen werden die der Software zugrunde liegenden Konzepte und Algorithmen anhand der wichtigsten Routinen detailliert dargestellt.

3.2.2.1 Datenmodell für die Speicherung der räumlichen Strukturdaten

a) Existierende Datenmodelle

Grundvoraussetzung für die automatisierte Strukturanalyse ist es, die vorliegenden 3D-Daten in ein für die Weiterverarbeitung sinnvolles Format zu bringen. Für den Computer stellen die vorliegenden Werte nach der vorangehend beschriebenen photogrammmetrischen Aufnahme nur eine Ansammlung von Geraden (beziehungsweise gegebenenfalls auch Kurven) und Punkten im dreidimensionalen Raum dar, es handelt sich also nach der Definition von GODIN et al. (1999) um die reinen Geometriedaten. Topologische Angaben hingegen, also Aussagen über die Zusammenhänge zwischen den einzelnen Zweigabschnitten beziehungsweise deren hierarchische Struktur, ergeben sich zwar für den menschlichen Betrachter aufgrund der Abstraktionsfähigkeit des Gehirns ohne weitere Probleme. Dem Computer fehlen diese Angaben allerdings. Gerade diese Parameter sind aber für eine strukturelle Analyse unbedingt notwendig, die Rohdaten müssen daher vor der automatisierten Weiterverarbeitung in ein geeignetes Architekturmodell eingepasst werden. Insbesondere für funktional-strukturelle Baummodelle wurden bereits einige derartiger Modelle vorgeschlagen, einen guten Überblick erhält man unter anderem durch die Lektüre der entsprechenden Beiträge in SILVA FENNICA 31(3) (1997) sowie in INRA (1998). Im Folgenden sollen einige existierende Ansätze kurz vorgestellt und ihre Eignung für den vorliegenden Anwendungsfall geprüft werden.

Im Rahmen des australischen „Virtual Plants“-Projektes, welches bereits in Abschnitt II.2.2.3 kurz beschrieben wurde, wird eine an L-Systeme angepasste Syntax verwendet: Um die Daten der hier erfassten landwirtschaftlichen Nutzpflanzen in für darauf basierende Simulationen geeignete Datenstruktur einzupassen, wird auf fraktale Modelle - wie sie bereits von PRUSINKIEWICZ und LINDENMAYER (1990) sowie PRUSINKIEWICZ und HANAN (1989) vorgeschlagen wurden - zurückgegriffen. Somit stellt sich das Pflanzenwachstum als eine Folge von Regeln dar, die Entwicklung der Pflanze wird anhand eines festgelegten Schemas erklärt. Es liegt nahe, dass diese Methode eher zur Simulation der idealtypischen Morphogenese des Pflanzenindividuums geeignet ist, als um die gegebenenfalls nicht immer diesen einfachen Regeln folgende Realität abzubilden. Zum Zweck der Simulation und Modellierung kommen L-Systeme allerdings oft zum Einsatz, so zum Beispiel auch bei KURTH und SLOBODA (1997).

Ein von der INRA (GODIN und GUÉDON, 1996; ausführliche, englischsprachige Darstellung zum Beispiel bei GODIN et al., 1999) entwickeltes Modell ist hingegen mehr auf die Bedürfnisse einer konkreten dreidimensionalen Erfassung der Pflanze zugeschnitten, da es speziell hierfür entwickelt wurde. Der Baum wird, wie bereits in Kapitel II.2.2.2 beschrieben, in einzelne Wachstumseinheiten unterschiedlichen Typs („growth units“, also Stamm-, Ast- und Zweigabschnitte, Knospen, Blüten, Blätter) als kleinste Strukturelemente gegliedert. Zusätzliches Ordnungselement sind die Achsen. So sind zum Beispiel der Baumstamm als Achse erster Ordnung und dessen Seitenäste als Achsen zweiter Ordnung anzusehen. Aufbauend auf diesen Grundelementen besteht die Beschreibungssyntax für die Baumstruktur auf einem komplexen „multi-scale tree graph“. Diese relative komplizierte

Syntax beinhaltet auch, in welchem Abhängigkeitsverhältnis die einzelnen Wachstumseinheiten zueinander stehen.

Basierend auf dieser Syntax wurde von der INRA ein System von aufeinander abgestimmten Softwaremodulen für Erfassung und Analyse entwickelt. So musste, da die von SINOQUET und RIVET (1997) verwendete 3D-Messmethode prinzipiell nur die geometrischen Daten der Pflanze erfassen kann, für die Vermessung ein eigenes Programm (*DiplAmi)* erstellt werden. Durch eine bestimmte, allerdings strikt vorgegebene Vorgehensweise bei der 3D-Vermessung kann hiermit die Baumtopologie parallel zu den geometrischen Daten erfasst werden. Auf diese Weise erhält man ein Strukturmodell des Baumes. Für dessen Auswertung steht ebenfalls angepasste Software, (*AMAPmod*, siehe GODIN et al., 1997; *AMAPpara*, siehe DE REFFYE et al., 1997), zur Verfügung. Erfassungshard- und Software sowie die generelle Vorgehensweise sind in diesem System der Strukturanalyse somit vollständig aufeinander abgestimmt. Dies bringt zwar Vorteile, wenn die Vermessung ausnahmslos gemäß diesen Vorgaben erfolgen kann. Weichen die Rahmenbedingungen oder die Messziele allerdings von der Standardsituation ab, so erweist sich dieser Ansatz als unflexibel.

Eine ähnliche Aufteilung in Wachstumseinheiten und Achsen liegt dem Modell INCA zugrunde (LE DIZÈS et al., 1997). Hier wurde allerdings ein deutlich einfacherer Modellsyntax gewählt, da es nicht um die Struktur allein geht, sondern um eine Simulation der Zusammenhänge von Struktur und Funktionalität. Auch GAFFREY und SABOROWSKI (1999a+b) verwenden eine Aufgliederung der Pflanze in Segmente, Knoten und Pfade.

b) Gewähltes Datenmodell

Die vorangehend beschriebenen Methoden zur Strukturbeschreibung von Pflanzen erweisen sich als sehr umfassend, allerdings auch als sehr komplex und relativ schwierig in der praktischen Handhabung. Zudem sind sie oft auf den jeweils vorliegenden, speziellen Anwendungsfall beziehungsweise auf eine spezielle Erfassungsmethode und das entsprechende Analysemodell zugeschnitten. Im vorliegenden Projekt wurde deswegen insbesondere auf eine einfacher lesbare und auch für die Weiterverarbeitung leichter handhabbare Syntax zur Charakterisierung der Pflanzenarchitektur Wert gelegt. Wichtig ist vor allem die problemlose Implementierbarkeit der Strukturbeschreibung in Software-Algorithmen. Hierzu wurde durchaus auf einige der den oben erwähnten Ansätzen zugrunde liegenden Prinzipien zurückgegriffen, allerdings im Endeffekt eine eigenständige und, insbesondere für den gegebenen Anwendungsfall, einfacher zu verwendende Beschreibungsmethode entwickelt.

Grundgedanke ist, wie bei den meisten der vorangehend beschriebenen Modelle, eine Aufgliederung des Messbaumes in Wachstumseinheiten. Dies kommt vom technischen Standpunkt aus der ohnehin erforderlichen segmentweisen Erfassung der einzelnen Internodien bei der Mehrbildtriangulation entgegen. Grundeinheit und kleinstes Element einer Baumbeschreibung ist das Pflanzensegment, welches als einzelner Datensatz einer umfangreichen Datenbank - der gesamte Pflanze - gehandhabt wird. In diesem Datensatz wird zum Beispiel jedem einzelnen Segment ein spezieller Typ, im vorliegenden Fall „Zweig“ ('Z') oder „Knospe“ ('K'), zugewiesen. Eine weitergehende Charakterisierung (Blüte, Blatt) ist bei einer genaueren Erfassung ebenfalls auch möglich, erfolgt jedoch im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht. Weiterhin enthält ein derartiger Segmentdatensatz unter anderem Angaben zur Länge das Segmentes und einen Verweis auf das Vorgängersegment. Genauer wird dies noch bei der Beschreibung der konkreten Implementation im nächsten Abschnitt beschrieben.

Zur Abspeicherung dieses grundlegenden Datenelements „Segment“ im Computer bietet sich eine für die EDV typische Datenstruktur, passenderweise auch hier „Baumstruktur“ genannt, an (AHO und ULLMANN, 1996, S. 295ff). Als Baumstruktur wird im Software-Engineering eine hierarchische Datenorganisationsweise mit den folgenden Charakteristika bezeichnet: Es gibt ein Ursprungselement (Datensatz), von dem alle anderen Elemente in einer verästelten Baumstruktur abhängen. Die einzelnen Datenelemente stehen somit in einem sogenannten „parent/child“-Verhältnis, dass heißt bis auf das Ursprungselement haben alle Elemente genau einen Vorgänger („parent“), und alle Segmente können keinen bis beliebig viele Nachfolger („children“) haben. Da diese Art der Datenorganisation in der EDV vom Bild eines Baumes mit Ästen und Verzweigungen entlehnt ist, bietet sie sich umgekehrt hervorragend dazu an, die Segmentdaten eines Baumes als eine Kette von zueinander im „parent/child“-Verhältnis stehenden Datensätzen abzuspeichern. Diese hierarchische Darstellung der Verzweigungsverhältnisse entspricht der Vorgehensweise, welche GAFFREY und SABOROWSKI (1999b) als „Pfade im Verzweigungsschema“ bezeichnen.

Die grundsätzliche Vorgehensweise hierzu ist in Abbildung 32 dargestellt: Die einzelnen Wachstumseinheiten werden zunächst bestimmten Hierarchieebenen zugeteilt. Die Segmente der Hauptachse werden als Elemente der ersten Hierarchieebene ('H1') angesehen und von der Sprossbasis als Ursprungselement aus durchnummeriert. Die Seitenäste ersten Grades zählen folglich zur zweiten Hierarchieebene ('H2'), diesmal vom jeweiligen Verzweigungspunkt aus durchnummeriert. Auf diese Weise werden alle Segmente des Baumes erfasst, und jedem Zweig-/Astabschnitt kann ein eindeutiger Datensatz zugeordnet werden. Der im Rahmen der vorliegenden Arbeit verwendete Begriff der „Hierarchieebene“ entspricht im Wesentlichen dem von GODIN et al. (1999) eingeführten Begriff der „Achse“ („axis“).

Eine Besonderheit ist dabei noch zu beachten: Hat ein „parent“-Segment nicht nur einen, sondern mehrere Seitentriebe gleicher Ordnung, so sind gemäß der oben beschriebenen Baumstruktur zwei oder mehrere gleichwertige „children“-Elemente vorhanden. Diese können mit der bislang beschriebenen Methode nicht eindeutig klassifiziert werden. In solchen Fällen werden diese gleichrangigen Seitentriebe zusätzlich durch eine fortlaufende Subindexziffer unterschieden. Während bei eindeutigen „parent/child“-Verhältnissen der Subindex entfällt (beziehungsweise '0' gewählt wird), wird bei Bedarf eine Unterscheidung in die Subindices '1' - 'n' vorgenommen. Gerade wenn Pflanzen wie die Fichte, anders als die Buche, mehrere gleichrangige Seitentriebe bilden, ist dies von Bedeutung. Die gleiche Vorgehensweise muss aber zum Beispiel auch bei Buchen im Falle von Zwieselbildungen, wenn also kein eindeutiger Leittrieb erkennbar ist, angewendet werden. Auf diese Art und Weise lässt sich die Struktur der Baumpflanze bis zur gewählten Verzweigungstiefe eindeutig, aber dennoch einfach, beschreiben und automatisiert analysieren.

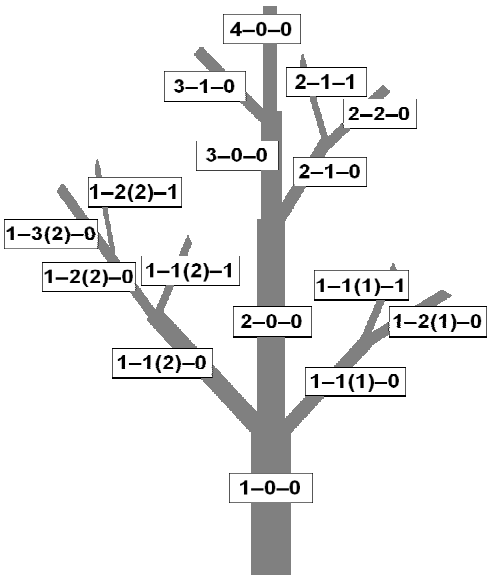

Abbildung 32: Syntax für das entwickelte einfache Architekturmodell. Der Einsatz von Subindices kann beispielsweise bei den gleichrangigen „child"-Segmenten 1-1(1)-0 und 1-1-(2)-0 mit gemeinsamen „parent"-Segment 1-0-0 nachvollzogen werden.

Durch diese Methode der Architekturbeschreibung wird die Verfügbarkeit beider Informationsebenen zur Baumstruktur, sowohl der Topologie als auch der Geometrie, gewährleistet:

- Der Inhalt jedes Datensatzes liefert sämtliche geometrischen Informationen zu der jeweiligen Wachstumseinheit. Insbesondere sind das Anfangs- und Endkoordinaten, aber auch weitere spezifische Charakteristika.

- Aus der Bezeichnung des Datensatzes geht hingegen die strukturelle Einordnung des Segmentes, also die Topologie hervor: Aus Hierarchieebene und gegebenenfalls Subindex lässt sich problemlos und eindeutig die hierarchische Einordnung des entsprechenden Segmentes innerhalb der Baumarchitektur (Vorgänger/Nachfolger) feststellen.

Alle wichtigen Kenndaten der einzelnen Wachstumseinheiten liegen somit als Datenbank in rasch analysierbarer Form vor. Ein Problem bleibt allerdings bestehen, welches auch die bereits beschriebenen anderen Architekturmodelle aufweisen: Die topologische Datenerfassung erfolgt nicht automatisch, die Einteilung in Hierarchieebenen muss von Hand vorgenommen werden.

3.2.2.2 Grundlegene Benutzung der Analysesoftware

Nach Abschluss der photogrammmetrischen Vermessung liegen nur die geometrischen Informationen mit den Koordinaten der einzelnen aufgenommenen Messpunkte vor. Zur weiteren Analyse der Baumarchitektur muss darüber hinaus eine manuelle hierarchische Eingliederung der einzelnen Wachstumseinheiten nach dem vorangehend beschriebenen Modell vorgenommen werden. Aufbauend auf diesen beiden Informationen kann das zur Strukturanalyse entwickelte Programm *PMAnalyse* weitergehende Informationen zur Baumtopologie machen.

Aufgerufen wird das Programm von der Kommandozeile aus, also über die (*MS-DOS*-)Eingabeaufforderung bei *MS Windows* beziehungsweise die *Unix*-Shell. Als obligatorische Parameter erwartet

es dabei die Angabe des Namens des zu öffnenden Messprojektes, möglichst in Form der Projekt-Nummer. Daraus wird der Dateinamen der Koordinatenliste (`<Projekt>c.txt`) und der Hierarchieliste (`<Projekt>h.txt`) gebildet. Diese beiden Tabellen müssen auf dem Datenträger vorliegen, sie werden als ASCII-Textdateien im CSV-Format (mit Leerzeichen, Tabulator etc. als Trennzeichen, wie durch die C-Funktion `fscanf()` vorgegeben) erwartet.

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt, sofern beim Programmaufruf nur die Projektnummer als Parameter angegeben wird, auf der Standardausgabe (`stdout`), also direkt als Text im Konsolenfenster. Wird hingegen ein weiterer Parameter übergeben, so werden daraus die Dateinamen für eine Ausgabe im aktuellen Verzeichnis gebildet. Es handelt sich bei diesen Ausgabetabellen um die Koordinatendatei `<Projekt>coord.txt`, die Segmentdatei `<Projekt>seg.txt`, die Baumdatendatei `<Projekt>tree.txt` sowie die Kronendatei `<Projekt>crown.txt`. Auch für diese Tabellen wird das CSV-Format verwendet.

Als Dezimaltrennzeichen wird in der gesamten Auswertesoftware, sowohl beim Datenimport als auch beim Datenexport, durchgängig der im englischen Sprachraum übliche Punkt ('.'), statt dem bei uns gebräuchlichem Komma (','), vorausgesetzt. *Photomodeler Pro* exportiert die Daten nur in diesem Format. Eine automatische Formaterkennung und Umschaltung durch die eigentlich in der Programmiersprache C vorgesehenen Lokalisierungsfunktionen scheitert daran, dass *MinGW* diese Internationalisierungsmechanismen unter *Windows* nicht unterstützt. Dies ist bei Weiterverarbeitung der unterschiedlichen Listen mit deutschsprachig lokalisierten Programmen zu beachten. Als Einheit für metrische Daten wird die Einheit Zentimeter verwendet, *Photomodeler Pro* muss somit entsprechend konfiguriert werden.

a) Format und Inhalt der Eingabedateien

Die strukturelle Analyse der Baumarchitektur durch *PMAnalyse* baut, wie bereits angesprochen, auf zwei Tabellen mit den Informationen zur Pflanze auf. Dabei handelt es sich zum einen um die Geometriedaten in Form der räumlichen Punktkoordinaten, welche in der im Folgenden als „Koordinatendatei“ bezeichneten Datei enthalten sind. Diese Informationen können direkt aus *Photomodeler Pro* exportiert werden. Die Informationen zur topologischen Gestalt werden hingegen einer sogenannten „Hierarchieliste“ entnommen.

PMAnalyse erwartet die direkt aus *Photomodeler Pro* übernommene Koordinatenliste, wie in Tabelle 9 dargestellt, im Format Punkt-ID, x-, y- und z-Koordinate, mit einer Kopfzeile für die Spaltenbezeichnungen. Die Photogrammmetriesoftware muss also dementsprechend eingestellt werden. Es wird davon ausgegangen, dass es sich bei den ersten acht Punkteinträgen (beziehungsweise die im Quellcode in der Variablen `numcp` genannte Anzahl) um die Kontrollpunkte handelt. Diese dürfen, da nicht der Messpflanze zugehörig, in der weiteren Auswertung nicht berücksichtigt werden.

Es ist weiterhin zu beachten, dass es sich bei der Punkt-ID um die von der Photogrammmetriesoftware vergebene Identifikationsziffer für den jeweiligen Punkt handelt, und nicht um eine laufende Nummer: Dadurch, dass die Punkte auf mehreren 2D-Bildern markiert und erst anschließend zueinander referenziert werden, werden aus den vielen separat laufend durchnummerierten 2D-Punkten auf den Einzelbildern die eindeutigen 3D-Punkte. Diese Unterscheidung zwischen laufender Nummer und ID einer Koordinate ist bei der weiteren Betrachtung der Software zu berücksichtigen.

Tabelle 9: Dateiformat der Koordinatenliste (Auszug).

Id	x (cm)	y (cm)	z (cm)
...	...	...	...
306	-5.868824	-17.439533	-3.682040
466	-13.871635	-11.000343	-19.022426
498	-9.653074	-3.919694	-17.934203
...	...	...	...

Bei dieser Koordinatenliste handelt es sich somit um die wesentlichen Eingabedaten bezüglich der Geometrie des Baumes. Zur Einbeziehung der Baumhierarchie und der topologischen Zusammenhänge dient als zweite obligatorische Eingabedatei die Hierarchieliste. In dieser Datei, deren Spalteneinteilung gemäß Tabelle 10 vorzunehmen ist, sind die manuell vorgenommenen hierarchischen Einordnungen der einzelnen Segmente abgespeichert. Zusätzlich kann die Hierarchieliste auch die Messwerte einer eventuell durchgeführten händischen Vergleichserhebung enthalten. Auf diese Weise kann eine Gegenüberstellung von manueller und photogrammmetrischer Messung direkt mit in die Auswertung einbezogen werden. Photogrammmetrisch oder manuell nicht erhobene Werte werden dabei durch die Eingabe des Wertes '0' kodiert.

Wie man aus der Tabelle entnehmen kann, ist die Auswertung in der vorliegenden Fassung von *PMAnalyse* auf fünf Hierarchieebenen samt Subindices, also Haupttrieb bis hin zu Seitenästen (beziehungsweise Knospen) vierter Ordnung, festgesetzt. Diese Einstellung lässt sich allerdings durch entsprechende Anpassung der Konstanten `MAXHLEVEL` (vergleiche Quellcode in Anhang C) modifizieren.

Die Spalten gemäß Tabelle 10 erklären sich folgendermaßen: Spalte 1 enthält die Nummer des Baumes (beziehungsweise die Projektnummer), den Einträgen 2 bis 6 ist die hierarchische Einordnung gemäß der definierten Syntax zu entnehmen (die Subindices sind den 'a'-Spalten zu entnehmen). Die folgenden Spalten enthalten, sofern vorhanden, Messergebnisse der manuell durchgeführten Erhebung. Im Einzelnen handelt es sich dabei um Segmenttyp (7), Mittendurchmesser (8), Segmentlänge (9) und Trockenmasse (10). In den Spalten 11 und 12 stehen die Punkt-IDs von Anfangs- und Endpunkt des Zweigabschnittes. Diese Information ist gleichzeitig auch der Verknüpfungspunkt zur vorangehend angesprochen Koordinatenliste.

Tabelle 10: Dateiformat der manuell erstellten *Hierarchiedatenliste* (Auszug).

(1)	(2)	(2a)	(3)	(3a)	(4)	(4a)	(5)	(5a)	(6)	(6a)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)
11	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Z	8.9	6.6	3.5912	183	186
11	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	Z	2.0	0	0.0000	184	183
11	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Z	4.0	6.5	1.6140	183	119
11	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	Z	7.6	0	0.0608	334	119
11	2	0	1	0	1	0	0	0	0	0	K	0.8	0	0.0023	297	334
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...

b) Format und Inhalt der Ausgabedateien

Nach Einlesen der beiden vorangehend beschriebenen Datentabellen kann *PMAnalyse* Aussagen zur Architektur des Baumes machen. Die Ergebnisse eines Programmdurchlaufs von PMAnalyse wer-

den in Form von vier verschiedenen Ergebnistabellen ausgegeben. Es handelt sich dabei um die folgenden Teilresultate einer Strukturbeschreibung:

- Koordinaten: Diese Tabelle enthält die auf den Sprossfußpunkt transformierten Koordinaten sämtlicher 3D-Punkte des Messprojektes. Diese Informationen sind für eventuelle weitere Auswertungen sowie für Kontrollzwecke gedacht.

- Segmente: Der Großteil der Auswertedaten fällt in dieser Liste an, welche sowohl die gemessenen (photogrammmetrisch und/oder händisch) als auch die weitergehend berechneten Informationen zu den einzelnen Zweig- beziehungsweise Astsegmenten des Baumes enthält.

- Baumdaten: Ergebnisse der Auswertung, welche sich nicht auf einzelne Wachstumseinheiten, sondern global auf die gesamte vermessene Pflanze beziehen, finden sich in dieser Tabelle.

- Kronendaten: In dieser Ausgabeliste werden die Angaben zur Kronenschirmfläche gebündelt zusammengefasst.

Tabelle 11 stellt zur Verdeutlichung zunächst das Format der Koordinatenliste dar. Neben der beim Einlesen durch *PMAnalyse* vergebenen laufenden Punktnummer (1) und der *Photomodeler Pro*-Punkt-ID (2) gehören dazu die kartesischen 3D-Koordinaten in Zentimetern (3-5) sowie die zweidimensionalen Polarkoordinaten mit der Entfernung 'r' zur Basis des Koordinatensystems (6) und dem Drehwinkel φ in Grad (7).

Tabelle 11: Listenformat der Koordinaten-Ausgabe (Auszug).

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
nr	id	x	y	z	r	angle
...	...	...	...	...	...	...
15	40	-15.373408	6.006539	21.515471	16.505157	158.658936
16	41	-15.779757	5.570055	22.165398	16.733986	160.557617
17	45	4.812125	-2.071219	23.775339	5.238940	336.712158
...	...	...	...	...	...	...

Wesentliches Resultat einer Strukturanalyse mit *PMAnalyse* ist weiterhin die Segmentliste, welche alle Angaben zu jedem einzelnen Ast- beziehungsweise Zweigabschnitt im Messprojekt zusammenfasst. Anhand von Tabelle 12 wird diese beispielhaft dargestellt: Neben der Identifikationsnummer des Segmentes (1) und der Angabe des zugehörigen Baumes (3) enthält jeder Segment-Datensatz auch die Nummer des Vorgängersegmentes (2). Weiterhin wird der Typ der Wachstumseinheit (Zweig 'Z' oder Knospe 'K') sowohl als berechneter Wert (5), als auch eventuell als händisch erfasster Wert (4), ausgegeben. Eintrag 6 enthält die Hierarchieebene, zu der das jeweilige Segment gehört ('1' steht beispielsweise für Hauptachse, '2' für Seitenast erster Ordnung usw.). Die Spalten 7 bis 11 enthalten die konkreten Angaben zur hierarchischen Einordnung des Segmentes (Hierarchieebene und gegebenenfalls Subindex). Diese Angaben sind aus der Eingabedatei „Hierarchieliste“ übernommen. Die Spalten 12 und 16 geben die Punkt-ID der beiden das Segment begrenzenden Punkte wieder, die entsprechenden räumlichen Koordinaten kann man den Einträgen 13 bis 15 respektive 17 bis 19 entnehmen.

Die eventuell manuell erfassten Werte von Durchmesser und Trockengewicht sind in den Spalten 20 und 21 enthalten. Die Einträge 22 und 23 enthalten die Segmentlänge, jeweils aus manueller und

photogrammmetrischer Messung. Gleichfalls sowohl aus händisch als auch photogrammmetrisch erfassten Werten berechnet liegt der Abstand zum Sprossfuß vor, also die Summe der Länge aller Vorgängersegmente (24 und 25). Spalte 26 enthält Angaben zum Astabgangswinkel, gemessen als Winkel zum Vorgängersegment. Die Listenpunkte 27 bis 30 geben die Abweichungen von photogrammmetrischer zu manueller Messung bei der Segmentlänge und beim Abstand vom Sprossbasispunkt wieder, sowohl in absoluten Werten (Suffix `_diff`) als auch in Prozent (Suffix `_pdiff`). Diese Informationen werden in die Ausgabe mit aufgenommen, damit die Differenzen zwischen händischer und photogrammmetrischer Messung direkt, ohne weitere Bearbeitungsschritte, mit statistischer Auswertesoftware verarbeitet werden können.

Tabelle 12: Listenformat für die Ausgabe der Segmentdaten (Auszug). Die Darstellung wurde aufgrund ihrer Breite auf mehrere Zeilen aufgeteilt.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(7a)	(8)	(8a)	(9)	(9a)	(10)	(10a)	(11)	(11a)
seg_id	pseg_id	tree_id	type_m	type_p	hlevel	h1	s1	h2	s2	h3	s3	h4	s4	h5	s5
10	9	2	K	K	3	3	0	3	0	1	0	0	0	0	0
11	9	2	Z	Z	2	3	0	4	0	0	0	0	0	0	0

(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)
p1_id	x1	y1	z1	p2_id	x2	y2	z2
1154	+8.885287	-5.988259	+23.894478	1153	+8.588003	-6.057725	+23.369526
1153	+8.588003	-6.057725	+23.369526	1174	+10.100910	-6.742505	+23.764847

(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)
dia_m	w_m	l_m	l_p	db_m	db_p
0.11	0.0020	0.4	0.57892	23.8	22.934589
0.32	0.2390	1.5	1.39873	23.8	22.934589

(26)	(27)	(28)	(29)	(30)
angle_p	l_diff	db_diff	l_pdiff	db_pdiff
133.8828	-0.17892	0.86541	-44.72976	3.63618
174.9533	0.10127	0.86541	6.75143	3.63618

Neben dieser Segmentliste, welche für jede Wachstumseinheit getrennt Informationen enthält, wird auch eine zusammenfassende Auswertung für die gesamte Baumpflanze erstellt. Tabelle 13 gibt einen Überblick über die von *PMAnalyse* errechneten Werte zum gesamten Baum.

Tabelle 13: Listenformat für die Ausgabe der globalen Baumdaten. Die Darstellung wurde auf mehrere Zeilen aufgeteilt.

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)
tree_id	nump	nums	buds_p	buds_m	bpoint_id	bpoint_nr	bseg_nr	height_p	length_p	length_m
15	96	94	48	48	69	14	0	65.170135	70.745743	69.528765

(12)	(13)	(14)	(15)	(16)
segs_h1	branches_b_h_1	angle_b_h_1	branches_h_1	angle_h_1
15	0	125.129547	0	119.765234

(17)	(18)	(19)	(20)	(21)
segs_h2	branches_b_h_2	angle_b_h_2	branches_h_2	angle_h_2
42	15	118.777321	8	114.911659

(22)	...	...	...	(37)
...	...	...	...	...

Spalte 1 enthält wieder die ID des Messprojektes beziehungsweise die Nummer des Messbaumes. Die Zahl der erfassten Messpunkte (ohne Kontrollpunkte) sowie Segmente findet sich unter den Punkten 2 und 3. In den nächsten beiden Spalten findet sich die Summe der photogrammmetrisch berechneten Knospen (4), sowie gegebenenfalls der entsprechende manuelle Wert (5).

Informationen zum Sprossfuß lassen sich den folgenden drei Einträgen entnehmen, nämlich die Punkt-ID (6) beziehungsweise die laufende Nummer (7) des Sprossfußpunktes sowie die Ordnungsnummer des untersten Segmentes (8). Spalte 9 enthält die photogrammmetrisch gemessene Baumhöhe, die Trieblänge des Haupttriebes für die Messalternativen „Photogrammmetrie“ und „Händische Messung“ ist in 10 und 11 enthalten.

Die folgenden Spalten (12-37) enthalten auf die jeweiligen Hierarchieebenen bezogene Informationen. Der erste Eintrag beinhaltet dabei die Anzahl der der entsprechenden Ebene zurechenbaren Segmente (in obigem Beispiel 15 für H1 und 42 für H2). Die Abzweigungen in die jeweilige Hierarchieebene folgen im Feld 13 (zum Beispiel 18 für H2 usw.). Die Spalte 15 (respektive 20) enthält ebenfalls diesen Wert, allerdings werden hierbei die als Knospen klassifizierten Segmente nicht als Verzweigung mitgezählt. Man sieht, dass im obigen Fall der Haupttrieb nicht verzweigt ist, ansonsten würde es sich um einen Zwiesel handeln. 15 Seitenäste ersten Grades - beziehungsweise 8, falls die Knospen nicht mitgerechnet werden - zweigen vom Leittrieb ab. Der durchschnittliche Astabgangswinkel beträgt für die erste Hierarchieebene etwa 125,1° (14), beziehungsweise 119,8° ohne Berücksichtigung der Knospen (16). Für alle anderen Hierarchieebenen sind diese Informationen in gleicher Form vorhanden, aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde aber auf die weitere Darstellung verzichtet.

Als letztes Analyseresultat zeigt Tabelle 14 die Ausgabe zur berechneten Kronenschirmfläche. Als Beispiel wird hier die Verwendung von acht Punkten gezeigt, welche die Schirmfläche durch einen Polygonzug darzustellen. Dies entspricht der gängigen forstlichen Praxis, zur Bestimmung dieses Parameters acht Kronenradien abzuloten (KRAMER und AKÇA, 1995, S. 74) Jeder dieser Werte definiert somit den Begrenzungspunkt der Kronenfläche in einem bestimmten 45°-Sektor. Die Anzahl derartiger Sektoren kann durch Anpassung der Konstante `CROWNPOINTS` im Programmquellcode entsprechend der gewünschten Genauigkeitsanforderungen geändert werden.

Tabelle 14: Listenformat der Kronendaten-Ausgabe, beispielsweise unter Verwendung eines Achtecks als Polygonzug.

sect	range	p_nr	p_id	angle	dist	x	y
1	0.0-45.0	11	54	1.718539	20.199739	-20.190653	-0.605784
2	45.0-90.0	14	69	180.000000	0.000000	0.000000	0.000000
3	90.0-135.0	14	69	180.000000	0.000000	0.000000	0.000000
4	135.0-180.0	72	287	170.727249	7.037769	6.945802	-1.134028
5	180.0-225.0	15	90	184.848038	10.095120	10.059004	0.853171
6	225.0-270.0	23	149	236.341476	6.128518	3.396682	5.101106
7	270.0-315.0	40	211	312.951965	23.322790	-15.891802	17.070536
8	315.0-360.0	82	322	327.832977	35.849880	-30.346910	19.086096
area:	411.633057						
circum-ference:	98.284401						

Die Ausgabetabelle enthält zum einen die Daten der Polygonpunkte im jeweiligen Sektor (Einteilung gemäß der Spalte „`range`“). Neben Punktnummer und ID sind auch die Polarkoordinaten und

die jeweiligen x- und y-Koordinaten aufgeführt. Auf eine Angabe der z-Koordinate wird verzichtet, da es sich bei dem Polygonzug ohnehin um ein ebenes Objekt handelt. Ist im jeweiligen Sektor kein geeigneter Punkt vorhanden, wird, wie im obigen Beispiel bei den Sektoren 2 und 3 zwischen 45° und 135° der Fall, auf den Sprossfußpunkt zurückgegriffen.

Als konkrete Angaben zum Kronenschirm wird in den beiden letzten Zeilen weiterhin die Fläche des von diesen Punkten begrenzten Polygons, also die Kronenschirmfläche, sowie deren Umfang ausgegeben.

3.2.2.3 Algorithmen und Grundstrukturen der Analysesoftware

a) Grundlegende programminterne Datenstrukturen

Die Auswertung der gemessenen räumlichen Daten mittels der entwickelten Software baut im Wesentlichen auf vier Datenstrukturen auf. In diesen sind alle für die Analyse relevanten Kennwerte, sowohl die vorangehend beschriebenen Eingangsdaten als auch die daraus generierten Werte, gespeichert. In den Grundzügen entsprechen diese Datenstrukturen deswegen inhaltlich den im vorangehenden Abschnitt bereits angesprochenen Ein- und Ausgabelisten von *PMAnalyse*. Technisch bietet sich für eine Implementierung dieser Datensätze in der Programmiersprache C der komplexe Datentyp `struct` an, mittels dessen sich der Entwickler seine eigenen Datentypen aus den vorhandenen, grundlegenden Datentypen zusammenstellen kann.

Um in denjenigen Fällen, in denen bestimmte Kennwerte sowohl manuell als auch photogrammmetrisch bestimmt werden, den Quellcode übersichtlich zu halten, wurden die folgenden Konventionen eingeführt: Variablen beziehungsweise auch Auswertefunktionen, welche sowohl aus photogrammmetrischer als auch aus manueller Messung vorliegen können, erhalten zur besseren Unterscheidung die Nachsilben „`_p`“ respektive „`_m`“. Weiterhin enden Variablen und Funktionen, die photogrammmetrische und manuelle Messung vergleichen, auf „`_mp`“, beziehungsweise bei Prozentangaben auf „`_mpr`“.

Im Folgenden sollen die vier für die Auswertung essentiellen Datenstrukturen dargelegt werden. In den entsprechenden Darstellungen werden dabei alle Werte, welche direkt aus der photogrammmetrischer Messung mit *Photomodeler Pro* hervorgehen beziehungsweise manuell eingeben wurden, grau hinterlegt dargestellt. Es handelt sich dabei um diejenigen Werte, welche weitgehend unverändert aus den in Abschnitt III.3.2.2.2 dargelegten Datensätzen übernommen werden. Alle anderen Werte werden durch *PMAnalyse* errechnet.

Datenstruktur „Baumdaten“

Die Struktur für die Baumdaten (`struct TREEDATA{}`) fasst als der übergeordnete Datentyp eines Messprojektes alle Kennwerte zusammen, welche global für die Pflanze als Ganzes gelten. Die hierin abgespeicherten Parameter sind in Tabelle 15 zusammengefasst und erläutert. Aufgrund ihrer übergeordneten Funktion enthält diese Struktur insbesondere auch Verweise auf die dem konkreten Baum zugehörigen Segment-, Kronendaten- und Koordinatenlisten. Eine Variable vom Typ `TREEDATA` fasst somit alle Informationen über die geometrische und topologische Struktur der zugehörigen Gesamtpflanze zusammen und dient als verbindendes Element sämtlicher verwendeter Teilstrukturen eines Messprojektes. Dies ist unter anderem auch deswegen von Vorteil, weil so für die meisten Programmfunktionen ein Zeiger auf die aktuelle `TREEDATA`-Struktur als Aufrufparameter ausreicht.

Tabelle 15: Beschreibung der Datenstruktur für die globalen Pflanzendaten.

Variablenbezeichnung	Datentyp (ANSI-C)	Erläuterung
treeid	unsigned int	Nummer des Baumes respektive Messprojektes
listseg	struct SEGMENT *	Zeiger auf die Liste, welche die Daten jedes Baumsegmentes enthält
listc	struct COORDINATE *	Zeiger auf die Liste, welche alle dreidimensionalen Punkt-koordinaten des Messprojektes enthält
crown	struct CROWN *	Zeiger auf die Struktur mit den Analysedaten zur Baumkrone
numc	unsigned int	Anzahl sämtlicher 3D-Koordinaten des Projektes (inklusive acht Kontrollpunkte)
nump	unsigned int	Anzahl der tatsächlichen Messpunkte an der Pflanze (ohne Kontrollpunkte)
nums	unsigned int	Anzahl der Baumsegmente
basispointnr	unsigned int	Laufende Nummer des Sprossbasispunktes
basispointid	unsigned int	Punkt-ID des Sprossbasispunktes
basissegid	unsigned int	Nummer des ersten Baumsegmentes
segs_level_m	unsigned int [MAXHLEVEL+1]	Array, in dem die Anzahl der Segmente pro Hierarchieebene abgelegt ist
height_p	float	Baumhöhe (aus photogrammmetrischer Messung)
length_m	float	Länge des Haupttriebes (aus manueller Messung)
length_p	float	-"- (aus photogrammmetrischer Messung)
num_buds_m	unsigned int	Anzahl der Knospen (aus manueller Messung)
num_buds_p	unsigned int	-"- (aus photogrammmetrischer Messung)
branch_raw	unsigned int [MAXHLEVEL+1]	Anzahl der Verzweigungen pro Hierarchieebene (einschließlich Knospen, aus photogrammmetrischer Messung)
branch_p	unsigned int [MAXHLEVEL+1]	-"- (ohne Knospen, aus photogrammmetrischer Messung)
branch_angle_raw	float [MAXHLEVEL+1]	Durchschnittlicher Astabgangswinkel pro Hierarchieebene (einschließlich Knospen, aus photogrammmetrischer Messung)
branch_angle_p	float [MAXHLEVEL+1]	-"- (ohne Knospen, aus photogrammmetrischer Messung)

Auf diejenigen Einträge, welche für eine Auswertung von besonderem Interesse sind, wird in den folgenden Abschnitten, insbesondere bei der Beschreibung der jeweils zugrunde liegenden Algorithmen, noch weiter eingegangen.

Datenstruktur „Koordinaten"

Grundlegendes Element des geometrischen Anteils der Messdaten sind die von *Photomodeler Pro* errechneten räumlichen Koordinaten der einzelnen Verzweigungs- und Endpunkte. Diese werden in Form der Koordinatendatei in die Auswertesoftware importiert. Im Programm selber werden sie in Form einer Liste von einzelnen Datensätzen des Typs `struct COORDINATE{}` verwaltet. Diese Liste wird anhand des im Baumdatensatz (siehe oben) gespeicherten Zeigers auf den ersten Koordinateneintrag (`listseg`) und der Anzahl der Koordinaten (`numc`) verwaltet. Auf jeden einzelnen Koordinaten-Eintrag kann so über dessen laufende Nummer zugegriffen werden.

Tabelle 16: Beschreibung der Datenstruktur für einzelne Koordinateneinträge.

Variablenbezeichnung	Datentyp (ANSI-C)	Erläuterung
pointid	unsigned int	*Photomodeler Pro*-Punkt-ID für den dreidimensionalen Punkt
x	float	x-Koordinate in Zentimetern (kartesische Koordinaten)
y	float	y-Koordinate in Zentimetern (kartesische Koordinaten)
z	float	z-Koordinate in Zentimetern (kartesische Koordinaten)
r	float	2D-Polarkoordinaten: Abstand vom Ursprung des Koordinatensystems
angle	float	2D-Polarkoordinaten: Winkel

Tabelle 16 beschreibt den Aufbau des Datentyps `COORDINATE`. Die einzelnen Einträgen stellen die kartesischen und polaren Koordinaten des jeweiligen Punktes dar. Allerdings handelt es sich dabei in diesem Fall nicht um die direkt von *Photomodeler Pro* gelieferten Werte, sondern um transformierte Koordinaten. Zusätzlich enthält jeder Punktdatensatz auch noch die von *Photomodeler Pro* vergebene Punkt-ID, da diese, zusätzlich zur laufenden Nummer, für verschiedene Auswerteschritte nötig ist.

Datenstruktur „Segment“

Eine entscheidende Grundlage für die weiteren Berechnungen mit der Auswertesoftware sind die Informationen über die einzelnen Zweig- und Triebabschnitte, aus denen die Pflanze besteht. An dieser Stelle müssen auch geometrische und topologische Informationen zusammengefasst werden. Zu diesem Zweck dient der Datentyp `struct SEGMENT{}` (Tabelle 17). Diese Datenstruktur beinhaltet optional die Werte einer manuellen Vergleichsmessung.

Tabelle 17: Datenstruktur für die einzelnen Wachstumseinheiten.

Variablenbezeichnung	Datentyp (ANSI-C)	Erläuterung
treeid	unsigned int	Nummer des Baumes / Messprojektes
parentid	int	Nummer des Vorgängersegmentes
point1	struct COORDINATE	Punkte, welche als Anfangs- und...
point2	struct COORDINATE	...Endpunkt das Segment begrenzen
hlevel	unsigned int	Hierarchieebene, zu der das Segment gehört
h	unsigned short int [MAXHLEVEL+1]	Hierarchiedaten gemäß Architekturmodell
hs	unsigned short int [MAXHLEVEL+1]	Hierarchiedaten (Subindex)
type_m	char	Typ des Segmentes (Zweig 'Z' oder Knospe 'K'), aus manueller Erfassung
type_p	char	-“-, aus photogrammmetrischer Messung
length_m	float	Länge des Segmentes (manuelle Messung)
length_p	float	Länge des Segmentes, berechnet aus der räumlichen Distanz der Endkoordinaten
length_diff_mp	float	Unterschied zwischen den manuell und photogrammmetrisch erhobenen Segmentlängen
length_diff_mpr	float	-“-, Angabe in Prozent
distancetobasis_m	float	Höhe des Segmentes am Baum, berechnet aus den Werten der manuellen Messung
distancetobasis_p	float	-“-, berechnet aus den Werten der photogrammmetrischen Messung

Variablenbezeichnung	Datentyp (ANSI-C)	Erläuterung
db_diff_mp	float	Unterschied der manuellen und photogrammmetrischen „Segmenthöhen“ (s.o.)
db_diff_mpr	float	-“-, Angabe in Prozent
diameter_m	float	Segmentdurchmesser (nur manuelle Erhebung)
weight_m	float	Segmentgewicht (nur manuelle Wägung)
angle_p	float	Winkel zum Vorgängersegment (nur photogrammmetrische Erhebung)

Die Segment-Datensätze sind, wie aus obigen Angaben zu ersehen ist, in Form einer einfach verketteten Liste implementiert: Jedes Element enthält einen Zeiger auf das jeweilige „parent“-Segment, so dass entsprechende Suchvorgänge innerhalb der Liste unkompliziert durchgeführt werden können. Auf einen Verweis auf „child“-Segmente wurde allerdings verzichtet. Zwar würde eine derartige doppelt verkettete Liste eine weitere Vereinfachung der Handhabung ermöglichen. Allerdings besteht das Problem, dass das „child“-Segment nicht eindeutig ist, je nach Verzweigungsmuster des Baumes kann es eine unterschiedliche Anzahl davon geben: Gemäß der Definition einer baumförmigen Datenstruktur, wie sie in Abschnitt III.3.2.2.1 vorgestellt wurde, gibt es nur ein „parent“-Element, die „child“-Anzahl hingegen kann jeden anderen Wert außer '1' annehmen.

Datenstruktur „Kronendaten“

In `struct CROWN{}` werden die Informationen zur Kronenschirmfläche in Form eines Polygonzuges abgespeichert. Zur Darstellung dieses Polygons wird eine in der Konstanten `CROWNPOINTS` festgelegte Anzahl an 2D-Punkten verwendet, genauere Details zur Vorgehensweise folgen später im Text. Die zugehörige Struktur (Tabelle 18) enthält zum einen die laufenden Nummern der einzelnen Punkte, aber aus Gründen einer einfacheren Handhabung auch die komplette Punkt-Struktur (`struct COORDINATE`). Als wichtige Ergebnisse der Analyse der Krone enthält die Struktur außerdem die Kronenschirmfläche und deren Umfang.

Tabelle 18: Beschreibung der Datenstruktur für die Kronenschirmfläche.

Variablenbezeichnung	Datentyp (ANSI-C)	Erläuterung
area	float	Kronenschirmfläche
circumference	float	Umfang des Kronenschirms
pointlist	unsigned int [CROWNPOINTS+1]	Laufende Nummer der die Kronenschirmfläche begrenzenden Punkte
points	struct COORDINATE [CROWNPOINTS+1]	Zeiger auf die Koordinateneinträge der Polygonpunkte

b) Grundsätzliche Programmroutinen

Nicht alle Programmfunktionen der Analysesoftware liefern direkt für die Auswertung der Baumarchitektur nutzbare Ergebnisse. Viele Unterroutinen dienen ausschließlich dazu, das vorliegende Datenmaterial auf geeignete Weise aufzubereiten. Da die tatsächlichen Auswerteroutinen aber darauf aufbauen, sollen im Folgenden diejenigen Hilfsroutinen, welche von grundlegender Bedeutung sind, vorgestellt werden. Eine Auflistung der Funktionalität und der Bedeutung sämtlicher Routinen von *PMAnalyse* findet sich, wie bereits angesprochen, in Anhang A.

Feststellen des Sprossfußpunktes

Als Sprossbasispunkt wird der Wurzelhals der Pflanze in Bodenhöhe definiert. Die Funktion `getbasispointnr()` kann zur Bestimmung dieses Punktes davon ausgehen, dass der Messpunkt mit der niedrigsten z-Koordinate - abgesehen von den Kontrollpunkten - der Sprossfußpunkt der Pflanze ist. Die laufende Nummer dieses Messpunktes wird dann unter anderem als Parameter für die nachfolgend beschriebene Transformation des Koordinatensystems verwendet.

Transformation des Koordinatensystems

Die Tatsache, dass für die Weiterverarbeitung der Geometriedaten nicht direkt die von *Photomodeler Pro* gelieferten Koordinaten, sondern entsprechend transformierte Werte verwendet werden, wurde bereits mehrfach erwähnt. Die Notwendigkeit einer derartigen Umrechnung ergibt sich aus der Anlage einer Messsession in *Photomodeler Pro*: Die signalisierten Kontrollpunkte sind durch das verwendete Kalibriergestell in quadratischer Form angeordnet. Daher verwendet das Photogrammmetrieprogramm den imaginären Punkt genau im Zentrum dieser Konstruktion mit gleichem Abstand zu allen Eckpunkten als Ursprung des lokalen Koordinatensystems. Für die vorgesehenen Pflanzenmessung hingegen macht es allerdings mehr Sinn, die Sprossbasis als Ursprung einzusetzen. Zu diesem Zweck dient die Unterroutine `setrootfrompointnr()`: Sie rechnet die Koordinatenliste durch Angabe der laufenden Nummer des Punktes, welcher als neuer Ursprung des Koordinatensystems dienen soll, auf ein neues Koordinatensystem um. Die Koordinaten werden, da ansonsten keine Änderung der Orientierung der Achsen vorgenommen werden muss, mittels einer vereinfachten Matrizenrechnung (ohne Drehmatrix) umgerechnet. Dazu wird folgende Formel auf alle Messwerte angewendet:

$$\begin{pmatrix} x_{neu} \\ y_{neu} \\ z_{neu} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x_{alt} \\ y_{alt} \\ z_{alt} \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} x_0 \\ y_0 \\ z_0 \end{pmatrix}$$

Formel 1: Transformation einer einzelnen Koordinate in ein Koordinatensystem mit neuem Ursprung, bei gleichbleibender Orientierung der Achsen. Erklärung der Indizes: „neu“ = transformierte Koordinate, „alt“ = ursprünglichen Koordinate, „0“=Koordinate des neuen Ursprungs.

Alle weiteren Operationen werden dann mit diesen neu berechneten Koordinaten und nicht mehr mit den Originaldaten von *Photomodeler Pro* durchgeführt.

Berechnen von 2D-Polarkoordinaten

Für die meisten Rechenschritte reicht die Kenntnis der kartesischen Koordinaten der Messpunkte, wie sie von *Photomodeler Pro* geliefert werden, aus. Für manche Routinen werden jedoch auch zweidimensionale Polarkoordinaten einzelner Punkte benötigt. Als 2D-Ebene wird dabei die Horizontalebene durch den Sprossbasispunkt, also die Bodenoberfläche, angenommen.

Die Berechnung der Polarkoordinaten gemäß nachstehender Formel 2 wird mit in der vorangehend angesprochenen Funktion `setrootfrompointnr()` vorgenommen. Die Ausrichtung des entstehenden polaren Koordinatensystems richtet sich nach der Ausrichtung des kartesischen Koordinatensystems und ist damit von der Aufstellung des Messprojektes (Kalibriergestell) abhängig.

$$\textbf{\textit{Abstand vom Ursprung}}: \quad r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

$$\textbf{\textit{Winkel}}: \quad \varphi = \arctan\left(\frac{y}{x}\right), \quad falls\ x > 0$$

$$\varphi = \frac{3 * \pi}{2}, \quad falls\ x = 0, y < 0$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2}, \quad falls\ x = 0, y > 0$$

$$\varphi = \pi + \arctan\left(\frac{y}{x}\right), \quad falls\ x < 0, y \geq 0$$

$$\varphi = -\pi + \arctan\left(\frac{y}{x}\right), \quad falls\ x < 0, y < 0$$

Formel 2: Berechnung von 2D-Polarkoordinaten (r und φ) aus den kartesischen Koordinaten x und y. Es ist zu beachten, dass die Angabe des Winkels φ im Bogenmaß erfolgt und zwischen +π und –π liegt.

Da der Ursprung des Koordinatensystem der Sprossfußpunkt ist, muss dieser ebenfalls in Polarkoordinaten umgerechnet werden. In diesem speziellen Fall (kartesische Koordinaten 0|0|0) ist der Winkel φ allerdings mathematisch nicht eindeutig definiert: Er kann theoretisch jeden beliebigen Wert annehmen. Der Einfachheit halber wird dieser Winkel für den vorgesehenen Anwendungszweck unter Missachtung mathematischer Gepflogenheiten auf 0° festgesetzt, da dies auf den weiteren Programmablauf keinen Einfluss hat. Zudem werden die ins Gradmaß umgerechneten Winkel zwischen +180° und -180° durch Addition von 180° auf ausschließlich positive Werte zwischen 0° und 360° transformiert. Diese Umwandlung des Koordinatensystems kann bedenkenlos vorgenommen werden, da bei der photogrammmetrischen Aufnahme keine absolute äußere Orientierung vorgenommen wurde.

Umgang mit Vektordaten - Skalarprodukt

Für bestimmte Messaufgaben reicht es nicht aus, die einzelnen Astsegmente lediglich als Verbindungslinien zwischen zwei räumlichen Punkten mit bekannten kartesischen Koordinaten zu sehen, sondern sie müssen oftmals auch als Vektoren betrachtet werden. Ein Vektor im dreidimensionalen Raum besteht aus den drei Richtungskomponenten, jeweils einer für die x-,y- und z-Achse. Um derartige Vektoren zu speichern, dient der Datentyp `struct VECTOR{}`. Die Vorgehensweise Berechnung der Vektordaten aus den kartesischen Koordinaten von Anfangs- und Endpunkt kann Formel 3 entnommen werden.

$$\vec{a} = \begin{pmatrix} x_1 - x_2 \\ y_1 - y_2 \\ z_1 - z_2 \end{pmatrix}$$

Formel 3: Berechnung eines Vektors anhand der Koordinaten von Anfangs- und Endpunkt.

Prinzipiell wäre es wünschenswert, die genauen Vektordaten jedes einzelnen Segmentes gleich im zugehörigen Segmentdatensatz mit abzulegen. Da jedoch jede Gerade als Vektor in zwei Richtungen gesehen werden kann, je nachdem, welcher Punkt als Anfangs- und als Endpunkte

verwendet wird, wären die Richtungskomponenten für den vorgesehenen Einsatzzweck, also insbesondere die Winkelberechnung, nicht eindeutig. Deswegen werden die Vektordaten eines Segmentes erst bei Bedarf errechnet, wenn die gewünschte Ausrichtung feststeht.

Die Berechung des Skalarproduktes (inneres Produkt) ist ein Rechenschritt, der ebenfalls insbesondere für die Winkelberechnung von Bedeutung ist. Ausführlich erklärt ist die Vorgehensweise zum Beispiel bei STÖCKER (1995). Das Skalarprodukt ist Resultat der Multiplikation zweier n-komponentiger Vektoren, welche - im Gegensatz zum Vektorprodukt - so ausgeführt wird, dass das Ergebnis ein Skalar, also eine reelle Zahl ist.

$$\textbf{\textit{für}}\ \vec{a}, \vec{b} \in \mathbb{R}^n\ \textbf{\textit{gilt}}: \quad \vec{a} * \vec{b} = c, \textit{wobei}\ c \in \mathbb{R}$$

$$\textbf{\textit{für}}\ n = 3\ \textbf{\textit{gilt}}:$$

$$\vec{a} * \vec{b} = \begin{pmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} * \begin{pmatrix} b_1 \\ b_2 \\ b_3 \end{pmatrix} = a_1 * b_1 + a_2 * b_2 + a_3 * b_3$$

Formel 4: Skalarprodukt zweier Vektoren im dreidimensionalen Raum (n = 3).

In der Routine `scalarproduct()` wird Formel 4 als C-Algorithmus für den dreidimensionalen Raum (n = 3) umgesetzt.

Funktionen zur Handhabung der Segmenthierarchie

Für verschiedene Zwecke muss festgestellt werden, zu welcher Hierarchieebene ein Ast-/Zweigabschnitt gehört, ob er zum Beispiel zum Haupttrieb oder zu den Seitenästen n-ten Grades gehört. Im Unterprogramm `getsegmenthlevel()` wird deshalb überprüft, für welche Hierarchieebene zum ersten mal eine Null eingetragen ist. Die untersuchte Wachstumseinheit gehört dann der vorhergehenden Hierarchieebene an.

Weiterhin kann anhand von vorgegebenen Hierarchiedaten festgestellt werden, ob ein derartiger Triebabschnitt existiert, und wenn ja, welche Nummer das Segment hat. Die Hierarchiedaten geben die abstrakte Positionierung in der Baumarchitektur an, die laufende Nummer ist hingegen für den schnellen Zugriff auf den konkreten Datensatz am Computer notwendig. Für diese Aufgabe ist die Funktion `getsegidfromh()` zuständig. Der hierzu abgewandte Suchalgorithmus geht der Reihe nach alle vorhandenen Segmentdatensätze durch, bis der Datensatz gefunden ist, dessen Hierarchiedaten den Suchkriterien entsprechen.

Insbesondere für die Winkelberechnung ist es von Bedeutung, herauszufinden, ob zwei Segmente einen gemeinsamen Punkt haben, und dessen laufende Nummer festzustellen. Die Routine `getcommonpoint()` bietet diese Funktionalität, als Aufrufparameter werden zwei `SEGMENT`-Strukturen erwartet.

Feststellen des Vorgänger- und Nachfolger-Segmentes

Die Überprüfung, welches Segment das „parent"-Segment eines gegebenen Segmentes ist, ist als Grundlage für zahlreiche andere Routinen wichtig. So benötigen zum Beispiel die Winkelberechnung und die Trieblängenberechnung diese Informationen. Die für die Segmentbeschreibung gewählte Syntax kommt der Implementation einer derartigen Routine sehr entgegen, wie aus Abbil-

dung 33 ersichtlich ist. Hierbei wird auf das Beispiel aus Abbildung 32 zurückgegriffen und von Zweig 1-2(2)-1 ausgehend jeweils das Vorgängersegment bis hin zur Sprossbasis bestimmt.

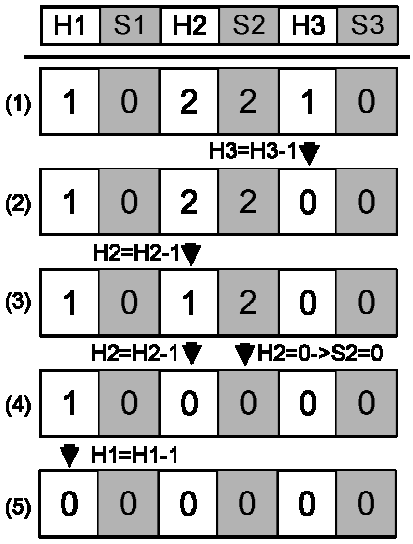

Abbildung 33: Vorgehensweise bei der Berechnung des jeweiligen Vorgängersegmentes, ausgehend von Segment 1-2(2)-1 aus Abbildung 32. Mit den Pfeilen werden jeweils die sich von Schritt zu Schritt verändernden Werte und der zugrunde liegende Rechenschritt gekennzeichnet.

Es wird zunächst die höchste vorhandene Hierarchieebene ermittelt, im konkreten Beispiel also H3 (Schritt 1), und der dort eingetragene Wert um 1 heruntergezählt (2). Der Subindex S3 wird hier, da ohnehin Null, ignoriert. Weil H3 im Schritt 2 Null erreicht hat, wird nun mit der nächstniedrigeren Hierarchiestufe, H2, weiter gezählt und der entsprechende Wert um eins erniedrigt (3). Dies erfolgt so lange, bis H2 Null erreicht hat (4). Im Falle von H2 muss auch der zugehörige Subindex beachtet und auf Null gesetzt werden, da sonst eine fehlerhafte Syntax zurückbleibt. Laut Definition muss der Subindex immer Null sein, wenn die zugehörige Hierarchieebene auch Null ist. Im fünften Schritt würde dann folgerichtig noch H1 dekrementiert. Dies macht aber keinen Sinn, da bereits das erste Baumsegment erreicht ist. Das Programm weiß nun, dass es am Sprossfußpunkt „angekommen“ ist.

Es wird somit nach dem für viele Software-Problemstellungen eingesetzten Zähler-Prinzip verfahren: Ein Zähler wird so lange heruntergezählt, bis ein Unterlauf auftritt, dann wird mit dem nächsten Zähler in der vorgegebenen Reihe weitergemacht. Die entsprechende Implementation in der Auswertesoftware findet sich in der Routine `getparentid()`.

Die umgekehrte Vorgehensweise, nämlich die Feststellung des Folgesegmentes anhand einer gegebenen „parent“-Wachstumseinheit, findet sich in der Funktion `getnextsegment()`. Das Nachfolgersegment ist allerdings, wie bereits angesprochen, nicht eindeutig, diese Funktion beschränkt sich deswegen darauf, das „child“-Segment in der selben Hierarchieebene zu bestimmen. So kann zum Beispiel vom Sprossfußpunkt aus die Länge des Leittriebes berechnet werden, indem alle Folgesegmente der Hierarchieebene '1' aufsummiert werden.

c) Berechnen der Segmentlänge

Als Segmentlänge wird die Länge der Gerade im Raum zwischen Anfangs- und Endpunkt des Segmentes betrachtet. Da die kartesischen Anfangs- und Endkoordinaten dieser Gerade bekannt sind, bietet sich die Implementierung einer Berechnung gemäß Formel 5, wie es in der Routine `distance()` verwirklicht ist, als Lösung für diese Aufgabenstellung an.

$$d = \sqrt{(x_1 * x_2)^2 + (y_1 * y_2)^2 + (z_1 * z_2)^2}$$

Formel 5: Berechnung des Abstandes d zwischen zwei durch die kartesische Koordinaten (x_1,y_1,z_1) und (x_2,y_2,z_2) definierten räumlichen Punkten.

Es ist, wie bereits angesprochen, zu beachten, dass die entwickelte Analysesoftware an dieser Stelle nicht den Einsatz von NURBS zur Darstellung des Zweigsegmentes erlaubt. Dies funktioniert deswegen nicht, da *Photomodeler Pro* - zumindest in der eingesetzten Version - keinen Export der eingemessenen Daten von NURBS in ein ASCII-Format erlaubt. Die nötigen Informationen liegen somit nicht als direkt weiter verwertbare Daten vor und müssten, zum Beispiel durch entsprechende Filterprogramme, aus der generierten DXF-Datei extrahiert werden. Auch ein direkter Zugriff auf diese Daten über die DDE-Schnittstelle von *Photomodeler Pro* ist vorerst nicht möglich.

Die Messprojekte, welche die Erfassung von NURBS beinhalten, wurden daher im Folgenden immer mit den Funktionen von Standard-CAD-Software durchgeführt, die automatisierte Auswertung kann nur Geraden verwenden.

d) Berechnen der Baumhöhe

Eine aufgrund der vorgenommenen Koordinatentransformationen ohne aufwändige Algorithmen zu berechnende Größe ist die Baumhöhe. Die reine Baumhöhe sei hierbei definiert als die Länge des vom höchsten gemessenen Punktes auf die horizontale Ebene durch die Sprossbasis (entsprechend der Bodenoberfläche) gefällten Lots. Da die Sprossbasis nach der vorgenommenen Transformation gleichzeitig der Ursprung des Koordinatensystems ist, der Nullpunkt somit ebenerdig liegt, besteht die praktische Umsetzung der Höhenberechnung darin, den Messpunkt mit der höchsten z-Koordinate zu finden und diesen z-Wert als Baumhöhe zu übernehmen. Diese Aufgabe übernimmt die Routine `gettreeheight()`. Es ist zu beachten, dass dieser höchste Messpunkt natürlich nicht unbedingt zum Leittrieb gehören muss - bei gekrümmten Baumformen kann auch ein höher aufragender Seitenast die maximale Pflanzenhöhe festlegen.

e) Feststellen der Länge des Haupttriebes

Der Berechnung der Länge des Leittriebes liegt eine komplexe Überlegung zugrunde. Allerdings zeigt sich an dieser Stelle wiederum, dass die entwickelte Datenstruktur einer Implementation mit Softwarealgorithmen entgegenkommt: Da, wie schon in Abschnitt III.3.2.2.3 dargelegt, die Segmentliste als einfach verkettete Liste ausgeführt ist, ist es möglich, von der obersten Triebspitze ausgehend sozusagen „nach unten“ alle Segmente zu durchlaufen: Das Vorgängersegment muss definitionsgemäß immer eindeutig sein. Durch Summieren der Einzellängen kann die gesamte Trieblänge errechnet werden.

Grundlegende Routine ist für diese Funktionalität `getshootlength_p()` (beziehungsweise die äquivalente Funktion für die manuell erhobenen Segmentlängen `getshootlength_m()`). Die jewei-

ligen Funktionen brechen beim Auftreten eines nicht erfassten Segmentes die weitere Bearbeitung mit einer entsprechenden, allerdings nicht kritischen, Fehlermeldung ab. Die Funktionen sind so konzipiert, dass sie die Entfernung jedes beliebigen Segmentes (genauer gesagt, die des näher am Sprossfußpunkt liegenden Punktes) bis hin zum letzten Segment in der selben Hierarchieebene finden. Zur Feststellung des nächsten Segmentes in der selben Hierarchieebene dient dabei die Routine `getnextsegment()`. Das heißt, die Funktion ist ohne weitere Modifikation, nur mit geänderten Aufrufparametern, auch zur Berechnung beliebiger Seitenastlängen geeignet.

f) Berechnen des Astabgangswinkels

Der Astabgangswinkel ist der Winkel zwischen einer Wachstumseinheit und deren Vorgängersegment. In der Funktion `getangle()` wird zu seiner Bestimmung der gemeinsame Punkt von „parent“ und „child“-Segment berechnet und mittels Vektorfunktionen (Formel 6) der Winkel zwischen den beiden Wachstumseinheiten festgestellt. Dabei erfolgt auch eine Umrechnung des Winkels ins Gradmaß.

$$\varphi = \arccos\left(\frac{(\vec{a} * \vec{b})}{(|\vec{a}| * |\vec{b}|)}\right)$$

Formel 6: Berechnung des Winkels (Angabe im Bogenmaß) zwischen zwei räumlichen Vektoren.

Um darüber hinaus auch Aussagen zu durchschnittlichen Verzweigungswinkeln für den gesamten Baum treffen zu können, dienen die beiden Funktionen `getanglesperlevel()` und `getanglesperlevel_raw()`. Diese Routinen unterscheiden sich darin, dass bei ersterer Variante keine Knospen in die Kalkulation der Verzweigungswinkel mit aufgenommen werden.

g) Unterscheidung des Segmenttyps (Knospe<->Zweigabschnitt)

Es soll für jede Wachstumseinheit festgestellt werden können, ob diese der Kategorie „Zweig“ ('Z') oder „Knospe“ ('K') zuzuordnen ist. Diese Angabe wurde bei der photogrammmetrischen Erfassung nicht mit erfasst. Es stellt sich die Frage, nach welchen Kriterien diese Unterscheidung anhand der vorliegenden Informationen nachträglich automatisch vorgenommen werden kann.

Für das Analyseprogramm wurde hierzu folgendes Unterscheidungskriterium eingeführt: Jedes Segment, welches ein Nachfolgersegment hat, kann keine Knospe sein, während umgekehrt jedes Segment ohne „child“-Segment als eine Knospe oder zumindest als ein in einer Knospe endender Zweigabschnitt anzusehen ist. Im Falle von abgebrochenen Zweigen oder ähnlichem führt dies natürlich zu Fehleinstufungen. Ein mögliches zusätzliches Unterscheidungskriterium wäre eventuell die Segmentlänge, wenn nur bei Unterschreiten einer festgelegten Maximallänge die Einteilung in die Kategorie „Knospe“ erfolgen würde. Da dies allerdings ebenfalls nicht eindeutig wäre und neue Ungenauigkeiten mit sich bringen würde, erscheint der vorangehend beschriebene, einfache Algorithmus als ausreichend genau.

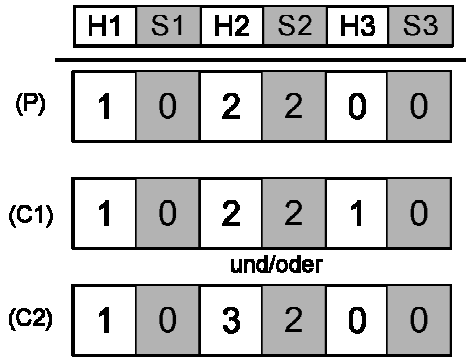

Abbildung 34: Darstellung der möglichen „child"-Segmente (C1 und/oder C2) eines „parent"-Segmentes (P).

Für die beschriebene Überprüfung ist die Routine `checkforchild()` zuständig, die nach dem in Abbildung 34 dargestellten Prinzip das Vorhandensein eines Nachfolgeabschnittes überprüft. Es sind zwei Alternativen ersichtlich, die es zu überprüfen gilt: Zum einen, ob ein Nachfolgersegment in der selben Hierarchieebene existiert (Alternative C1), zum anderen ob eines in der nächst niedrigeren Hierarchieebene vorhanden ist (C2)[18]. Die Überprüfung kann dabei mit der vorangehend beschriebenen Funktion `getsegidfromh()` durchgeführt werden. Liefert diese Funktion eine Fehlermeldung, so existiert das gesuchte „child"-Segment nicht.

h) Berechnungen zum Kronenschirm

Auch zur Krone können Strukturangaben gemacht werden. Beispielhaft soll hier die Berechnung der Kronenschirmfläche und deren Umfang gezeigt werden. Aus Sicht der Computergrafik lässt sich diese Fläche am einfachsten als geschlossener Polygonzug repräsentieren. Eine derartige Form hat zudem den Vorteil, dass sie für weitergehende Berechnungen deutlich einfacher zu handhaben ist als beispielsweise abgerundete Formen.

Die Fläche eines geschlossenen Polygonzuges mit n Scheitelpunkten lässt sich nach Formel 7 relativ einfach berechnen. Es handelt sich bei dieser Formel im Endeffekt um das Resultat einer Triangulierung der Fläche des Vielecks (siehe im Internet [21] und [22]). Formel 8 zeigt weiterhin die Berechnungsweise des Polygonumfanges. Diese beiden Summenfunktionen haben auch den Vorteil, dass sie sich softwaretechnisch relativ einfach in C implementieren lassen. Es ist bei der Umsetzung lediglich zu beachten, dass für die „i+1"-Werte im letzten Durchlauf (n-1) noch einmal die entsprechenden Werte des ersten Scheitelpunktes einzusetzen sind.

$$\sum_{für\ i=(0\ bis\ n-1)} 0{,}5*(x_i * y_{i+1} - y_i * x_{i+1})$$

Formel 7: Berechnung der Fläche eines ebenen, geschlossenen Polygonzuges mit n Scheitelpunkten. Siehe dazu Anmerkungen im Text.

18 Genau genommen würde eine Überprüfung der Alternative „C1" ausreichen, da „C2" nur auftreten kann, wenn auch „C1" vorhanden ist. Da die Hierarchiedaten allerdings per Hand eingegeben werden müssen, werden aus Gründen der Fehlertoleranz beide Varianten überprüft.

$$\sum \sqrt{(x_i - x_{i+1})^2 + (y_i - y_{i+1})^2}$$
$$für\ i = (0\ bis\ n-1)$$

Formel 8: Berechnung des Umfanges eines ebenen, geschlossenen Polygonzuges mit n Scheitelpunkten. Siehe dazu Anmerkungen im Text.

Mit der Umsetzung obiger Formeln in den Funktionen `calculatearea()` und `calculateoutline()` steht das Instrumentarium zur Verfügung, um die Fläche von beliebigen ebenen Polygonen zu berechnen. Es ist aber noch festzulegen, welche der gemessenen 3D-Punkte als Scheitelpunkte des Vielecks herangezogen werden. Dazu wird zunächst die Kronenprojektionsfläche definiert, also die Projektion sämtlicher Messpunkte auf die Ebene horizontal durch den Sprossfußpunkt. Wie schon zuvor bei der Höhenberechnung ist dieser Schritt relativ einfach zu handhaben: Um diese 2D-Daten zu erhalten, muss lediglich die z-Koordinate der 3D-Koordinaten außer Acht gelassen werden. Das Resultat dieser Transformation ist in Abbildung 35 zu sehen.

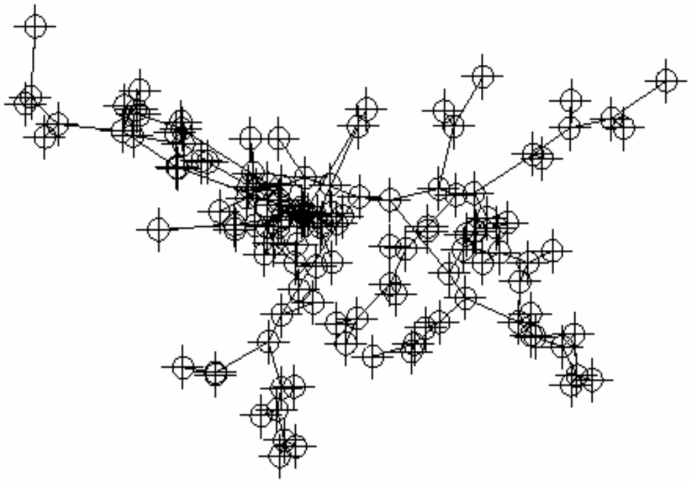

Abbildung 35: Darstellung der Kronenprojektionsfläche als zweidimensionale Projektion der gemessenen Punkte auf eine horizontale Ebene durch den Sprossfußpunkt.

Weiterhin muss noch eine Regelung eingeführt werden, welche dieser Punkte als Eckpunkte des Polygons dienen sollen. Für die vorliegende Messaufgabe wurde dazu die Fläche, angelehnt an die übliche Vorgehensweise, in acht Kreissektoren geteilt, welche somit jeweils einen Winkel von 45° abdecken. In jedem dieser Abschnitte wird der vom Ursprung und damit vom Sprossfußpunkt am entferntesten liegende 2D-Punkt als Eckpunkt des Polygons angenommen. Ist im jeweiligen Sektor kein Punkt vorhanden, wird der Sprossfußpunkt selber verwendet. Das Resultat einer derartigen Aufteilung ist in Abbildung 36 zu sehen.

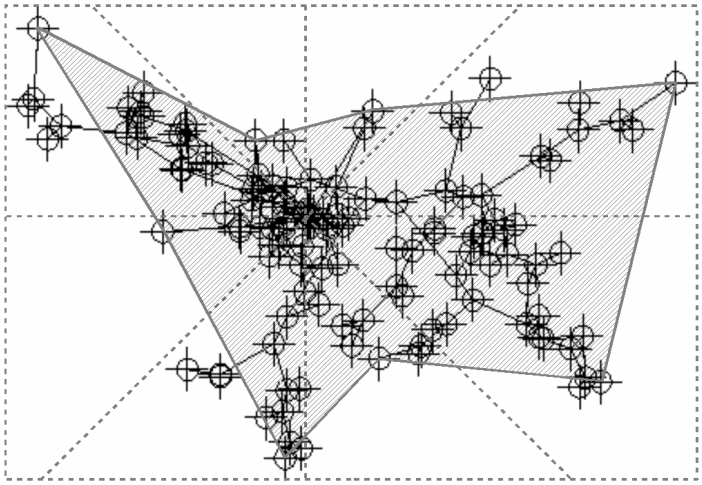

Abbildung 36: Darstellung der Kronenprojektionsfläche aus Abbildung 35 als Polygonzug, konstruiert durch Aufteilung in 45°-Segmente und Festsetzung des jeweils vom Ursprung am entferntesten liegenden Messpunktes als Scheitelpunkt.

Wie aus der Abbildung ersichtlich, kommen gerade bei einer Aufteilung der Projektionsfläche in wenige Sektoren mehrere Messpunkte der Pflanze außerhalb des als Kronenprojektionsfläche definierten Bereichs zu liegen. Abhilfe lässt sich allerdings durch eine feinere Einteilung erreichen. *PMAnalyse* muss dazu unter entsprechender Änderung der Konstante `CROWNPOINTS` neu kompiliert werden. Abbildung 37 zeigt beispielhaft die Verwendung eines Polygonzuges aus 16 Punkten. Auf diese Art und Weise kommen deutlich weniger Messpunkte außerhalb der Polygonfläche zu liegen. Eine Aufteilung der Kronenfläche in noch kleinere Winkel führt allerdings zwangsläufig dazu, dass in immer mehr Fällen der Sprossfußpunkt als Eckpunkt des Polygonzuges angenommen werden muss.

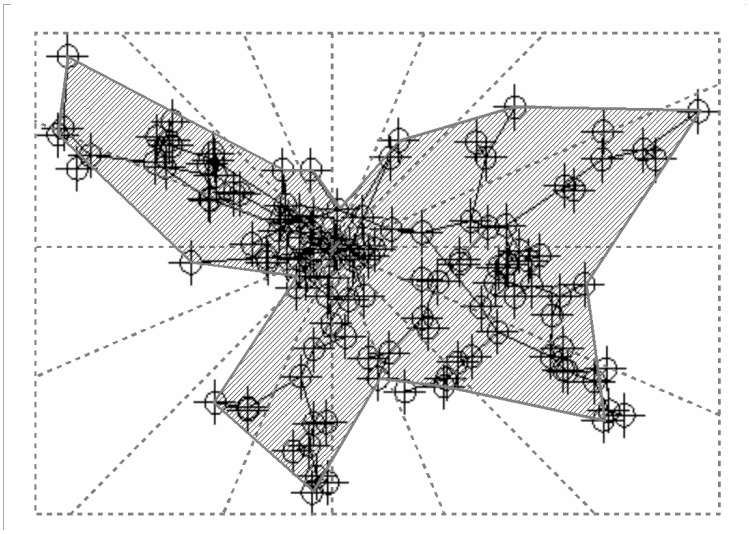

Abbildung 37: Darstellung der Kronenprojektionsfläche analog zu Abbildung 36, allerdings bei einer Sektoreneinteilung von 22,5° (16 Sektoren).

Aus der vorgehenden Beschreibung der Vorgehensweise ist ersichtlich, dass prinzipiell zum Errechnen der Kronenschirmfläche (beziehungsweise Kronenprojektionsfläche) keine Hierarchiedaten nö-

tig sind. Die beschriebenen Berechnungsschritte lassen sich auch unter Verwendung ausschließlich der auf den Sprossbasispunkt als Ursprung transformierten Messkoordinaten durchführen.

3.2.3 Auswertung von Körperdaten und Biomassewerten

3.2.3.1 Durchmesser

Die bisher vorgestellten Auswertungen beruhen alle auf den von *Photomodeler Pro* gelieferten reinen Strukturdaten des räumlichen Objektes. Zusätzlich zu den typischen Fähigkeiten einer auf Mehrbildtriangulation ausgelegten Photogrammmetriesoftware bietet dieses Programm allerdings auch, wie bereits angesprochen, einige Funktionen zum Vermessen räumlicher Körper. Insbesondere die Zylinder sind hierbei zur Durchmesserermittlung sehr hilfreich.

Da diese Zylinder als Messkörper allerdings nicht in das auf Strukturdaten ausgelegte Konzept der vorangehend beschriebenen Auswertesoftware hineinpassen, erfolgt die Auswertung der Durchmesser getrennt: Durch das standardisierte 3D-Format können die Analysen sowohl in der Photogrammmetriesoftware selber als auch in CAD-Programmen ausgeführt werden. Eine Verarbeitung der Durchmesserdaten mit *PMAnalyse* ist jedoch durch die bereits angesprochene Beschränkung des *Photomodeler Pro*-Datenexports nicht möglich.

Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden die benötigten Durchmesserdaten somit gemäß der bereits dargelegten Methodik photogrammmetrisch aufgenommen und noch in der Photogrammmetriesoftware einzeln vermessen. Eine Aufnahme des Mittendurchmessers jedes einzelnen Segmentes erwies sich dabei als sehr aufwändig, als Messgrößen bieten sich vielmehr hauptsächlich die folgenden Parameter an:

- Sprossbasisdurchmesser: Der Wurzelhalsdurchmesser, erhoben drei Zentimeter über der Bodenoberfläche, ist eine wichtige Kenngröße, welche in vielen waldbaulichen Untersuchungen an jungen Pflanzen verwendet wird (zum Beispiel AMMER, 2000).

- Triebmittendurchmesser: Das gleiche gilt für den Mittendurchmesser das Leittriebs. Aufgrund der im vorliegenden Projekt angewandten Messmethodik wird für diesen Wert der Mittendurchmesser der in der Triebmitte liegenden Wachstumseinheit verwendet. Diese erhält man entweder durch direktes Abmessen in *Photomodeler Pro* oder anhand der mittels *PMAnalyse* errechneten Werte.

- Astbasisdurchmesser: Für eine eventuelle anschließende Biomasseschätzung empfiehlt sich die Messung des Durchmessers der Seitenäste erster Ordnung (am Abzweigungspunkt).

- Für eine exakte Vermessung ist weiterhin die Vermessung sämtlicher Segmentdurchmesser denkbar, indem diese alle als Zylinder aufgenommen werden. Dies wurde im Rahmen des vorliegenden Projektes allerdings nicht durchgeführt.

Gerade bei der Durchmessererfassung ist es wichtig, die entsprechenden Zylinder exakt zu markieren. Es empfiehlt sich daher, diese Kennzeichnung nur auf Bildern vorzunehmen, auf denen der entsprechende Sprossabschnitt deutlich und kontrastierend zum Hintergrund erkennbar ist. Da sich Zylinder durch *Photomodeler Pro* bereits mit zwei Messbildern referenzieren lassen, sollten dafür wenige, aber qualitativ gute Fotos ausgewählt werden.

3.2.3.2 Möglichkeiten zur Gewinnung von Biomassedaten

Die in den vorangehenden Abschnitten beschriebenen Arbeitsschritte ermöglichen es, automatisierte Auswertungen der Baumstruktur durchzuführen, ergänzt durch Durchmessermessungen an einzelnen Stellen. Von daher bietet es sich an, diese photogrammmetrisch zu gewinnenden Informationen auch zur Schätzung von Biomassedaten heranzuziehen.

AMMER (2000, S. 67ff) hat anhand von Untersuchungen an jungen Buchen nach Abschluss der Vegetationsperiode ein Modell entwickelt, um die Trockengewichte des Haupttriebes und der einzelnen Seitenäste zu schätzen. Zur Erstellung dieses Modells wurden dabei 40 Buchen im Alter von zwei bis acht Jahren herangezogen, mit Sprosslängen zwischen etwa 10 und über 150 Zentimetern und Sprossbasisdurchmessern bis zu etwa zwei Zentimetern. Damit entspricht dieses Kollektiv in wesentlichen Kennwerten den im Rahmen der vorliegenden Arbeit für die photogrammmetrischen Messungen herangezogenen Pflanzen. Es liegt daher nahe, die entsprechenden Formeln auch an den im Rahmen des vorliegenden Projektes vermessenen Buchen auszutesten.

Im Falle das Leittriebes gilt gemäß der zitierten Untersuchung eine Formel, welche auf den Eingangsparametern Sprossbasisdurchmesser (Messung in drei Zentimeter Höhe über dem Boden), Sprossmittendurchmesser und Sprosslänge basiert. Die mittlere quadratische Abweichung bei Formel 9 liegt dabei bei ±0,016.

$$VS = Sprossbasisdurchmesser * Sprossmittendurchmesser * Sprosslänge$$

$$\boldsymbol{Sprosstrockengewicht} = e^{(-0,726276 + 0,934375 * \ln(VS))}$$

Formel 9: Schätzung des Sprosstrockengewichts junger Buchen (in Gramm) nach AMMER (2000). Längen- und Durchmesserangaben in Zentimetern.

Um daneben auch noch die Asttrockengewichte der einzelnen Seitentriebe messen zu können, wurde eine weitere Gleichung aufgestellt (Formel 10), diesmal basierend auf Astlänge und Durchmesser an der Zweigbasis: Die mittlere quadratische Abweichung liegt in diesem Fall bei ±0,063.

$$VA = Astbasisdurchmesser^2 * Astlänge$$

$$\boldsymbol{Asttrockengewicht} = e^{(-1,019289 + 0,83100 * \ln(VA))}$$

Formel 10: Schätzung das Asttrockengewichts (in Gramm) einzelner Seitenäste junger Buchen nach AMMER (2000). Längen- und Durchmesserangaben in Zentimetern.

Somit beruhen diese Formeln auf Werten, welche zum einen durch *PMAnalyse* bereitgestellt werden (Sprosslänge), beziehungsweise durch die Photogrammmetriesoftware abgegriffen werden können (Durchmesser). Kommt es gar nicht auf eine genaue Strukturvermessung an, so bietet es sich an, nur die gewünschten Werte direkt in *Photomodeler Pro* abzugreifen und auf die Ausscheidung von Einzelsegmenten und die Verwendung komplexer Architekturinformationen ganz zu verzichten.

3.3 Ergebnisse

3.3.1 Messergebnisse

Bevor in den folgenden Teilabschnitten das entwickelte Messverfahren in Hinblick auf erreichbare Genauigkeit und Zeitaufwand evaluiert wird, sollen einleitend zunächst beispielhaft Messwerte einer derartigen photogrammmetrischen Vermessung dargestellt werden. Bei der Vorstellung des Verfahrens wurde dazu bislang vorwiegend die Auswertung auf Basis der einzelnen erfassten Pflanzensegmente vorgestellt: Die Wachstumseinheit ist die Grundeinheit des entwickelten Modells und der zugehörigen Auswertesoftware.

In Tabelle 19 wird im Gegensatz dazu der Schwerpunkt mehr auf eine Zusammenfassung wesentlicher Kennwerte für die gesamte Baumpflanze gelegt. Beispiele für die Darstellung der resultierenden 3D-Modelle können Abbildung 38 entnommen werden. Es ist zu beachten, dass die hierfür verwendete 3D-Software (*Actify 3DView*) die DXF-Dateien in der Einheit Millimeter statt Zentimeter interpretiert.

Tabelle 19: Ausgewählte Messergebnisse der photogrammmetrischen Strukturanalyse an Buchenpflanzen.

Baumnummer	Wachstumseinheiten	Knospen	Höhe (cm)	Trieblänge (cm) (Summe Segmente)	Trieblänge (cm) (NURBS)	Trieblänge (cm) (direkte Line)	Seitenäste	Winkel (°)	Basisdurchmesser (cm)	Mittendurchmesser (cm)	Biomasse Leittrieb (g)	Biomasse Leittrieb (g) Durchmesser manuell	Kronenschirmfläche (cm²)
1	119	60	59,42	65,12	65,53	59,051	8	111,28	0,73	0,49	9,205	7,751	688,00
2	35	13	30,19	39,88	39,03	24,176	5	103,67	0,62	0,45	4,622	4,211	369,24
3	103	52	64,13	66,45	67,55	65,193	9	112,54	0,80	0,49	10,212	9,936	591,16
4	93	47	22,52	36,40	37,54	30,423	8	115,84	0,52	0,47	3,756	3,387	298,45
5	135	68	72,94	78,39	80,26	75,693	9	117,89	0,90	0,61	16,344	14,568	666,21
6	53	23	38,13	43,19	42,82	40,329	6	112,20	0,51	0,46	4,261	3,580	486,21
7	101	50	32,92	38,89	40,33	36,993	8	120,41	0,52	0,47	3,996	2,420	569,59
8	142	71	69,43	76,97	76,22	71,592	9	113,62	0,80	0,59	13,959	12,087	701,15
9	30	12	21,14	23,53	24,82	22,422	3	122,43	0,40	0,23	0,992	0,720	280,14
10	109	55	53,74	69,64	72,01	65,333	8	120,70	0,78	0,49	10,449	10,591	653,11
11	93	47	65,85	72,02	71,43	70,247	8	117,88	0,69	0,49	9,465	10,050	629,52
12	106	51	60,67	66,02	65,41	62,734	9	121,87	0,79	0,55	11,234	8,243	532,89
13	87	44	48,96	53,53	52,92	51,913	7	116,57	0,54	0,34	4,117	4,097	346,73
14	78	41	37,14	52,87	52,49	43,837	5	137,63	0,69	0,49	7,193	8,360	551,24
15	94	48	65,17	70,75	69,53	68,801	8	114,91	0,81	0,53	11,790	9,612	411,63
16	147	74	59,74	62,54	64,13	61,421	10	120,43	0,89	0,60	12,853	10,484	495,55
17	90	46	51,22	55,83	55,01	53,848	10	117,34	0,58	0,25	3,442	4,308	490,32
18	171	91	75,13	85,14	84,82	76,153	15	109,31	1,31	0,84	33,806	23,436	711,17
19	129	61	70,16	77,92	77,58	73,459	11	119,85	0,85	0,54	13,595	11,391	707,26
20	72	35	35,14	39,87	39,32	37,197	7	119,29	0,59	0,44	4,295	2,725	352,25

Die obige Tabelle enthält ausschließlich photogrammmetrisch bestimmte Messwerte, nicht die eventuell händisch erhobenen Vergleichswerte. Zunächst wird dabei für jede gemessene Baumpflanze die Gesamtanzahl der erfassten Wachstumseinheiten sowie die Anzahl der davon als Knospen identifizierten Segmente angegeben. Die nächsten Spalten dienen dem Vergleich dreier unterschiedlicher Methoden zur Längenberechnung des Haupttriebes. Zum einen sind das die auch von *PMAnalyse* praktizierte Addition der einzelnen Segmentlängen (als Geraden) sowie die Verwendung einer NURBS-Kurve. Weiterhin ist zusätzlich noch die direkte Entfernung zwischen Sprossfußpunkt und Endknospe (als Gerade) angegeben. Unter „Seitenäste“ ist die Anzahl der Verzweigungen „H2“ ohne Knospen zu verstehen. Dabei ist auch noch der durchschnittliche Abgangswinkel der Seitenäste angegeben.

In den folgenden Spalten stehen die Schätzwerte für die Sprossbiomasse (Leittrieb) nach der Formel von AMMER (2000): Als Eingangsparameter für die Trieblänge dient jeweils der in der fünften Spalte angegebene, photogrammmetrisch gemessene Wert. Für Basis- und Mittendurchmesser werden zum einen ebenfalls die Werte aus der Fotomessung herangezogen, zum Vergleich zusätzlich aber auch die genaueren, manuell gemessenen Werte (vorletzte Spalte). In der letzten Spalte ist noch die Kronenschirmfläche bei der Verwendung eines Polygons mit acht Ecken angegeben.

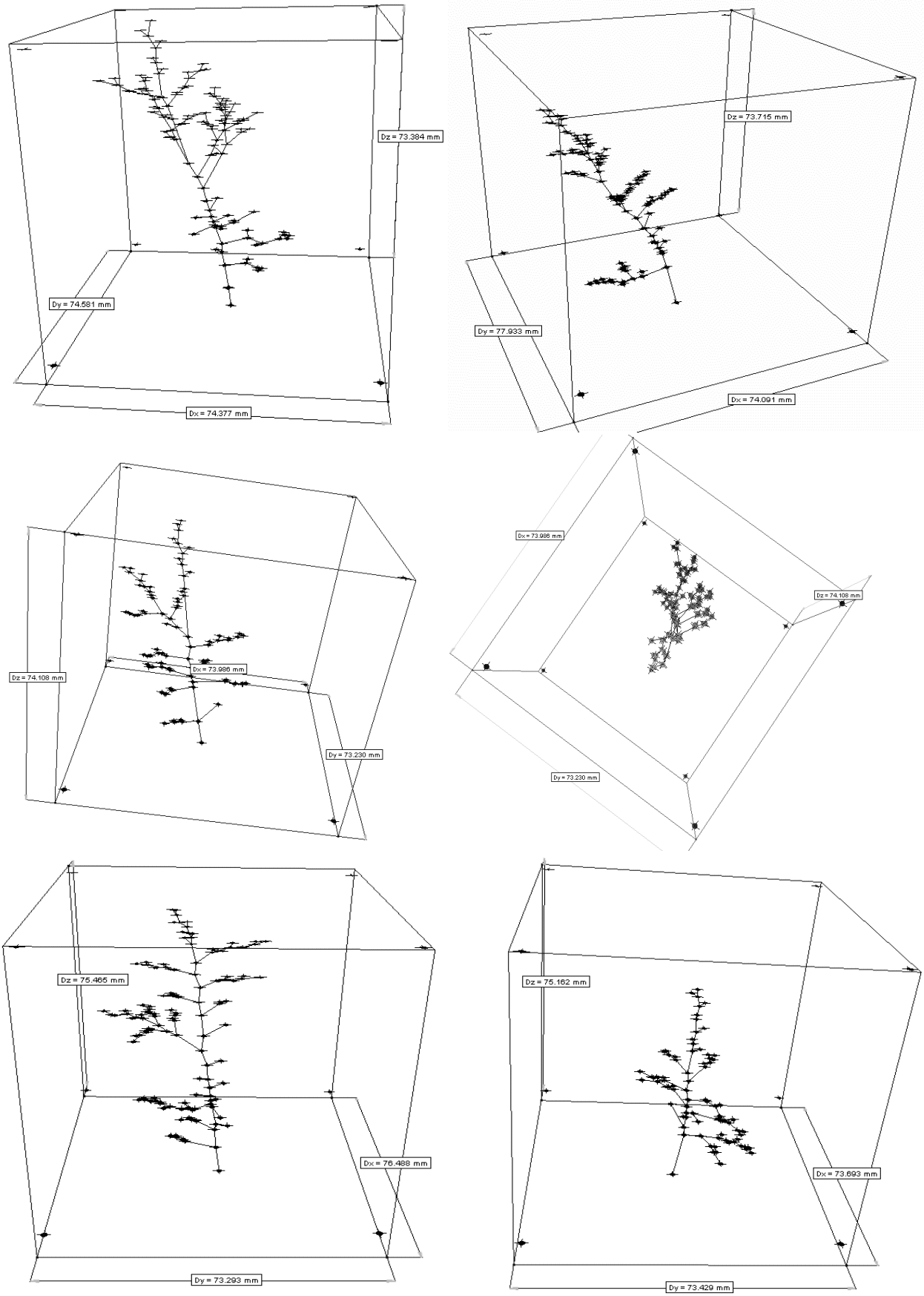

Abbildung 38: Beispiele für dreidimensional erfasste Buchenpflanzen. Projektnummern, von links oben nach rechts unten: 5, 10, 15, 19, 12, 13.

3.3.2 Messgenauigkeit

3.3.2.1 Ursachen für Ungenauigkeiten bei der Mehrbildtriangulation

a) Prinzipielle Gründe für Ungenauigkeiten

Die Genauigkeit der photogrammmetrischen Triangulation wird verfahrensbedingt von vielen Einflussgrößen bestimmt. Zahlreiche Faktoren, welche die Präzision beeinflussen können, wurden bereits in Abschnitt II.2.2.6 bei der grundsätzlichen Beschreibung der Photogrammmetrie angesprochen. Insbesondere zu nennen sind dabei die inneren Kennwerte der Kamera und die Qualität der Kalibrierung. Weiterhin gibt es Faktoren, welche speziell die Mehrbildtriangulation betreffen, wie den Winkel zwischen den Aufnahmepositionen und die Anzahl der Kontrollpunkte pro Bild. Ein allgemeiner Überblick über die bei der terrestrischen Fototriangulation zu beachtenden Ungenauigkeitsquellen findet sich bei KRAUS (1996, S. 211ff sowie 1997, S. 281ff bezüglich des Bündelblockausgleichs). Alle dort genannten Punkte gelten auch beim Einsatz der Triangulation im Rahmen der Pflanzenvermessung. Eine genaue Darstellung und Quantifizierung dieser prinzipiellen Ursachen für Messungenauigkeiten würde allerdings den Rahmen der vorliegenden Arbeit sprengen, daher wird auf die angesprochenen Literaturstellen verwiesen.

b) Unzulänglichkeiten der Digitaltechnik

Die insbesondere durch die Auflösung, aber auch durch die mangelnde Auslegung auf photogrammmetrische Zwecke bedingte Ungenauigkeit der verwendeten „non-metric“-Kamera wurde schon in Kapitel II.2.2.6.1 angesprochen. In diesem Zusammenhang von besonderem Interesse ist insbesondere die durch die Kameraauflösung bedingte Ungenauigkeit. Genauer, als ein Objektpunkt auf dem digitalen Bild (ein Pixel) zu sehen ist, lässt er sich in der Photogrammmetriesoftware auch nicht markieren. Gerade bezüglich der Kameraauflösung erweisen sich analoge Modelle den digitalen Modellen allerdings noch als überlegen.

Geht man von der höchsten Auflösung der eingesetzten Kamera *Kodak DC265* aus, also 1.536 x 1.024 Pixel, so kann folglich auch nur diese Anzahl von Punkten auf jedem der 2D-Bilder eindeutig unterschieden und markiert werden. Das Seitenverhältnis der entstehenden Bilder beträgt bei der verwendeten Kamera 5:4 (Herstellerangaben für Fotos im Querformat). Legt man eine typische Aufnahmesituation bei der Vermessung von Baumpflanzen zugrunde, so wird, abhängig von der Zoomeinstellung, auf Höhe des Messobjektes eine Objektebene von etwa 100 x 80 Zentimetern erfasst (Werte wie Aufnahmeentfernung etc. können über die bereits angesprochenen Metadaten im Digitalbild ausgelesen werden). Es soll im Folgenden davon ausgegangen werden, dass die Objektebene annähernd senkrecht zur Kameraachse liegt.

Ausgehend von dieser Kalkulation kann man die Markiergenauigkeit schätzen: In x- und y-Richtung repräsentiert ein Pixel auf dem Digitalbild in der realen Szene eine Fläche von etwa 0,065 x 0,078 cm². Daher kann festgestellt werden, dass theoretisch jeder zu erfassende Punkt des Messobjektes auf dem digitalen Foto mit einer Genauigkeit von unter einem Millimeter aufgelöst und markiert werden kann. Dieser Befund deckt sich mit den Berechnungen von CLARK et al. (2000), welche beim Einsatz einer digitalen Kamera mit einer deutlich geringeren CCD-Auflösung (850 x 984 Pixel) mit einer Objektauflösung von 0,7 Millimeter pro Meter Aufnahmeentfernung kalkulierten.

Diese Berechnung berücksichtigt allerdings nur die reine Auflösung des Digitalbildes. Eventuelle andere Ungenauigkeiten und Unschärfen, beispielsweise durch Konstruktionsmängel des Objektives, können ohne entsprechende Spezialausrüstung auch nicht genauer quantifiziert werden. Dennoch lässt sich sagen, dass selbst mit einer nach dem heutigen Stand der Technik bereits als veraltet einzustufenden digitalen Kamera theoretisch die Möglichkeit gegeben ist, ausreichend präzise Markierungen vorzunehmen. Das oft aufgeführte Argument der prinzipiell für photogrammmetrische Zwecke vollkommen ungeeigneten Auflösung von Digitalkameras lässt sich im vorliegenden Einsatzfall nicht mehr für jeden Anwendungsbereich nachvollziehen.

c) Ungenauigkeiten bei der Festlegung der Kontrollpunkte

Da die Markierung der Kontrollpunkte, welche die notwendigen, grundlegenden Informationen für das „inverse camera"-Verfahren in das Messprojekt einbringen, von entscheidender Bedeutung für die insgesamt erreichbare Messgenauigkeit ist, soll auf diesen Punkt besonders eingegangen werden. Das Kontrollgestell wurde sorgfältig und robust gebaut, natürlich können aber Ungenauigkeiten dabei nicht vollständig ausgeschlossen werden. Jede Abweichung von der optimalen Würfelform (Eckwinkel ≠90°, Kantenlänge ≠70 cm) führt zu falscher Einmessung der Kontrollpunkte und zu entsprechenden Folgefehlern bei der Berechnung der Messpunkte. Derartige Probleme kann allerdings *Photomodeler Pro* in gewissen Masse kompensieren, indem man der Software Genauigkeitsgrenzen für die signalisierten Punkte mitgibt. Im konkreten Fall wurde, aufgrund der entsprechenden Markierung der Kontrollpunkte, von einer Genauigkeit von ±2 mm bei der Markierung der signalisierten Punkte ausgegangen. Die Photogrammmetriesoftware zieht diese Angabe bei der Projektbearbeitung in Betracht und führt eine Selbst-Kalibrierung anhand der bekannten räumlichen Daten durch. Im Rahmen dieser Feinjustierung können auch die Kontrollpunkte um diesen Wert in ihrer 3D-Lage verändert werden, falls die aus den anderen Daten ermittelte räumliche Gesamtsituation eine geringfügig andere Lage als wahrscheinlich erscheinen lässt.

d) Ungenauigkeiten bei der Bearbeitung der Messpunkte

Die bedeutendste Fehlerquelle stellt bei der Mehrbildtriangulation, anders als beim Volumenschnitt, der Bediener dar, da die Punktmarkierung manuell erfolgt. Von der ungenauen Positionierung von Messpunkten bis hin zur falschen Referenzierung existieren somit zahlreiche Ursachen für Fehler. Eine falsche Referenzierung fällt zwar meist unmittelbar bei der Projektberechnung durch *Photomodeler Pro* auf, aber die folgende Suche nach den falsch zugeordneten Punkten an sich kann länger dauern.

Bei der Markierung der Messpunkte hingegen ist schon alleine bedingt durch die Eigenarten des Messobjektes mit Ungenauigkeiten zu rechnen: Gerade die Verzweigungspunkte können nicht eindeutig markiert werden. Es wird zwar versucht, möglichst „in die Mitte zu treffen" (vergleiche Abbildung 26). Prinzipiell können die Punktmarkierungen auf einzelnen Bildern aber dennoch um eine gewisse Entfernung voneinander abweichen. Diese Schwankungen betreffen dann allerdings nur die Genauigkeit der Messung des aktuellen Segmentes und gleichen sich bei der Messung des gesamten Triebes wieder aus. Problematischer sind diese Folgefehler betreffs ihres Einflusses auf die Selbst-Kalibrierung von *Photomodeler Pro*. Inwieweit dies von praktischer Bedeutung ist, wird im folgenden Abschnitt bestimmt werden.

Aufgrund der oben angesprochenen Punkte lässt sich sagen, dass Ungenauigkeiten des Bedieners beim Messobjekt Pflanze den größten Anteil an den auftretenden Messfehlern haben, die vorangegangen beschriebenen prinzipiellen Probleme dürften eher von untergeordneter Bedeutung sein. In

den folgenden Abschnitten wird deswegen der Schwerpunkt auf die Beschreibung der in der praktischen Vermessungstätigkeit auftretenden Fehler gelegt.

3.3.2.2 Quantifizierung der im praktischen Einsatz auftretenden Fehler

In der praktischen Anwendung ist die Fragestellung von Bedeutung, wie genau bei der vorgegebenen Konstellation einzelne Pflanzenparameter erfasst werden können. Bei der Betrachtung der folgenden Ergebnisse bezüglich der Messgenauigkeit der photogrammmetrischen Triangulation in der beschriebenen Konstellation ist zu beachten, dass eine normale manuelle Messung als Referenz herangezogen wird. Auf diese Weise können einige Messgrößen sehr genau bestimmt werden, zum Beispiel die mit Präzisionswaagen ermittelten Trockengewichte oder die mittels Schublehre gemessenen Durchmesserwerte. In anderen Fällen muss allerdings davon ausgegangen werden, dass die händischen Messungen gewissen Ungenauigkeiten unterliegen, wie zum Beispiel bei der Längenmessung mit einem angelegten Maßband:

- Das Festlegen von Anfangs- und Endpunkt des Segmentes ist nicht eindeutig möglich. Zudem ist es leicht möglich, dass, gerade an den Verzweigungspunkten, Überschneidungen oder auch Lücken bei der Messung auftreten.

- Die Messung ergibt, je nachdem, wo das Maßband beziehungsweise der Messfaden an der Sprosskrümmung angelegt werden, unterschiedliche Werte.

Genau das sind aber Punkte, in denen die berührungsfreie photogrammmetrische Vermessung Genauigkeitsvorteile gegenüber einer händischen Messung aufweist. Obwohl die manuelle Datenerfassung somit nicht unbedingt als das exaktere Verfahren angesehen werden kann, wird sie hier - da momentan das gängige Verfahren - als Referenzwert für den Vergleich mit der photogrammmetrischen Messung herangezogen.

a) Quantifizierung der Ungenauigkeiten bei der Längenmessung

Im Rahmen der Quantifizierung der bei der Längenmessung auftretenden Ungenauigkeiten sollen im Folgenden zwei Aspekte betrachtet werden: Zum einen wird auf der Ebene des Einzelsegmentes der Unterschied zwischen der händischen Messung der Wachstumseinheit mittels angelegtem Maßband und der photogrammmetrischen Erfassung als Gerade herausgearbeitet. Als zweite Option wird die Genauigkeit der Vermessung längerer Triebe in Form von NURBS im Vergleich zu anderen Messalternativen betrachtet.

Ungenauigkeiten bei der Vermessung von Einzelsegmenten als Gerade

Grundlage der Strukturanalyse mit der entwickelten Software *PMAnalyse* ist die einzelne Wachstumseinheit einer Baumpflanze als kleinste Einheit der Architekturbeschreibung. Deswegen ist von besonderem Interesse, inwieweit die hierfür praktizierte photogrammmetrische Erfassung dieser Pflanzenbestandteile als Gerade korrekte Ergebnisse für die Längenmessung ergibt.

Zur Untersuchung dieses Sachverhaltes wurden 1532 Wachstumseinheiten von 17 der im Detail vermessenen Buchen herangezogen (weitere 83 Segmente dieser Messpflanzen konnten aufgrund fehlender Werte für einen der beiden Parameter nicht mit in den Vergleich einbezogen werden). Die Streudiagramme in Abbildung 39 zeigen hierzu die Abweichungen der photogrammmetrisch gemessenen Segmentlängen von den entsprechenden manuell erfassten Werten. Abweichungen

im positiven Bereich bedeuten hier (und in den folgenden Ausführungen), dass das Messergebnis der photogrammmetrischen Messung höher ausfiel als das der manuellen Erfassung, bei negativen Werten lieferte hingegen die händische Vermessung eine größere Segmentlänge.

Tabelle 20 listet in Ergänzung dazu die entsprechenden statistischen Kennwerte auf. Dabei wird auch der Mittelwert der Abweichungsbeträge (vorzeichenbereinigt) mit in die Betrachtung aufgenommen. Dieser beträgt nur 0,26 cm, die Differenzen zwischen beiden Messvarianten schwanken dabei zwischen etwa +2,3 cm und -1,8 cm. Die beiden Paramameter „manuelle gemessene Segmentlänge“ und „absolute Abweichung der photogrammmetrischen Messung“ sind dabei nicht korreliert (r = 0,034), die Schwankungsbreite ändert sich bei zunehmender Segmentlänge kaum. Entsprechend fallen die prozentualen Unterschiede zwischen beiden Messvarianten bei zunehmender Länge der Wachstumseinheit immer weniger ins Gewicht.

Im rechten Streudiagramm von Abbildung 39 wird dieser Sachverhalt verdeutlicht: Bei kurzen Segmentlängen (um und unter 1 cm) treten teilweise deutliche relative Abweichungen auf (bis zu 150%), bei zunehmender Länge der Wachstumseinheit fällt dieser Unterschied aber prozentual immer geringer ins Gewicht. Zur Verdeutlichung zeigen die Histogramme in Abbildung 40 die entsprechenden Häufigkeitsverteilung der Messdifferenzen.

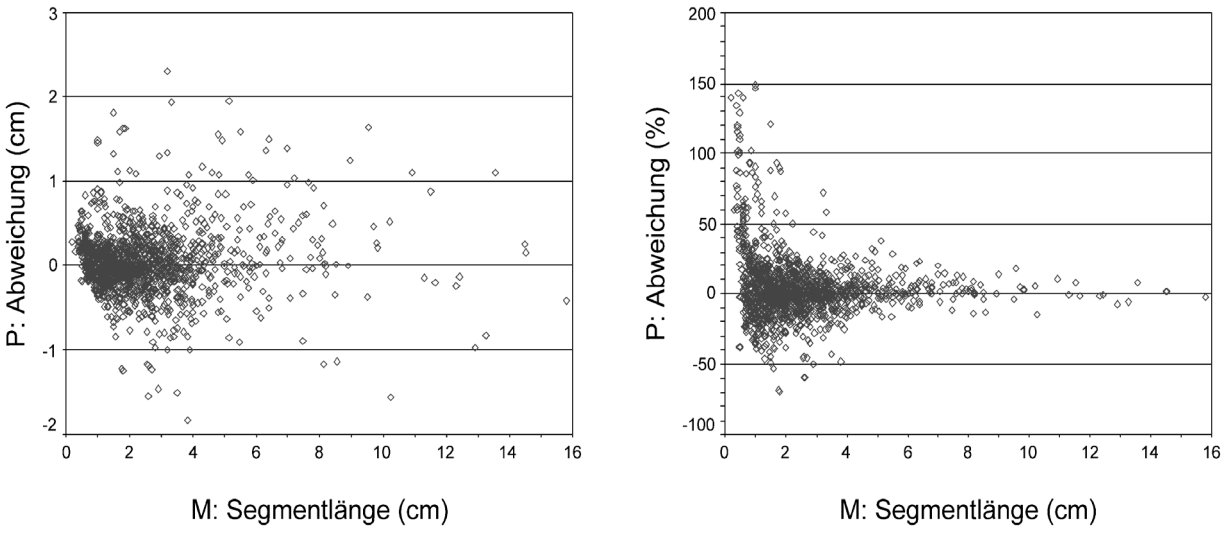

Abbildung 39: Absolute und relative Abweichung der photogrammmetrisch erhobenen Segmentlängen (Ordinate, P) von den händisch gemessenen Werten (Abszisse, M) bei unbelaubten Buchen.

Tabelle 20: Vergleich der Messergebnisse der photogrammmetrischen mit der händischen Längenmessung bei Einzelsegmenten - statistische Kennwerte.

Längenmessung der Einzelsegmente photogrammmetrisch ↔ manuell	**Minimum** (maximale Unterschätzung)	**Maximum** (maximale Überschätzung)	**Standard-abweichung**	**Mittelwert** (der Beträge)
Abweichung (cm)	-1,822358	2,313330	0,38185612	0,26069403
Prozentuale Abweichung (%)	-69,332120	148,98054	23,77526812	14,755455

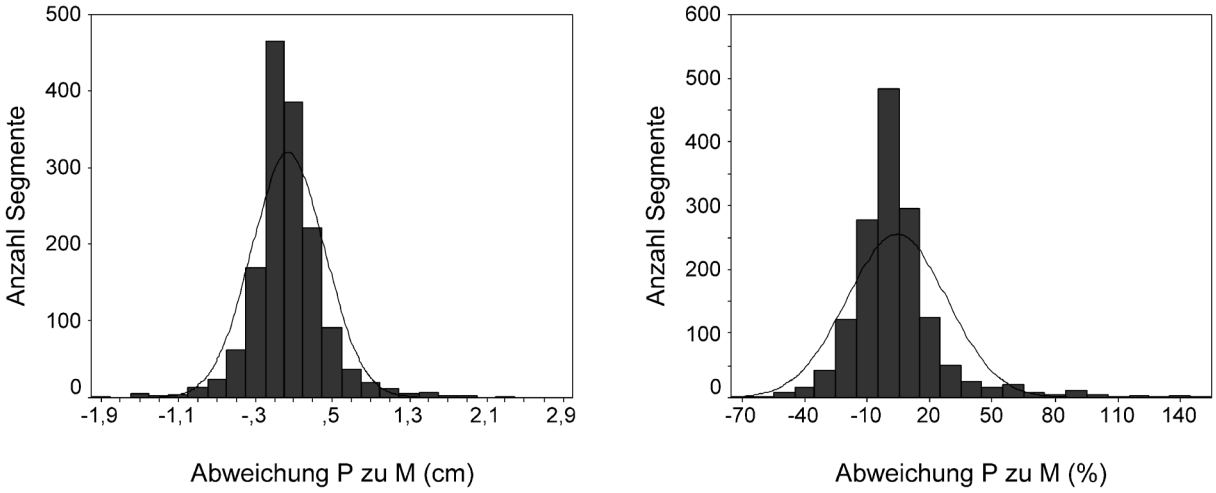

Abbildung 40: Häufigkeitsverteilung der Abweichung der photogrammmetrischen Messung (P) von der manuellen Messung (M). Linke Grafik: Verteilung der absoluten Abweichungen. Rechte Grafik: Verteilung der relativen Abweichungen.

Die Unterschiede zwischen den beiden Messvarianten lassen sich folgendermaßen erklären: Die Ansatzpunkte der Messung an der Pflanze, also Segmentanfang und Segmentende, sind, wie bereits angesprochen, sowohl photogrammmetrisch als auch händisch nur schwer eindeutig anzuvisieren. Dadurch treten - unabhängig von der Länge des Segmentes - zwangsläufig ungerichtete Messunterschiede von mehreren Millimetern auf. Dieser Messfehler wirkt sich bei kurzen Segmenten prozentual entsprechend höher aus. Im Zweifelsfall ermöglicht die photogrammmetrische Messung sogar die besseren Ergebnisse, da auf den Fotos problemlos die Verzweigungsmitte angepeilt werden kann (vergleiche dazu Abbildung 26).

Negativ auf die photogrammmetrische Erfassung der Knospen wirkt sich die Tatsache aus, dass diese kurzen und oft eng am Ast anliegenden Wachstumseinheiten auf den Fotos oftmals schlecht zu identifizieren und markieren sind. Dies spiegelt sich in den deutlichen Unterschieden zwischen den beiden Messvarianten insbesondere bei kurzen Wachstumseinheiten - dabei handelt es sich oft um Knospen - wieder.

Ungenauigkeiten bei der Vermessung von gesamten Trieblängen

Im vorhergehenden Abschnitt wurde gezeigt, dass es bei der detaillierten Erfassung einer Baumpflanze ausreichend ist, wenn die einzelnen, relativ kurzen Wachstumseinheiten zur Längenmessung als Geraden aufgefasst werden. Dies ist auch die im Auswerteprogramm *PMAnalyse* implementierte Vorgehensweise. Zur Berechnung von Gesamttrieblängen wird in diesem Fall die Summe der einzelnen Teilsegmentlängen gebildet.

Nicht für jede Aufgabenstellung ist jedoch eine zeitaufwändige Erfassung der Pflanze in ihren einzelnen Wachstumseinheiten erwünscht. Soll beispielsweise nur die Länge des Haupttriebs gemessen werden, so könnte auch hierfür vereinfacht die direkte Entfernung zwischen Sprossfußpunkt und Spitzenknospe abgegriffen werden. Allerdings weicht diese gedachte Linie in der Regel deutlich vom tatsächlichen Verlauf des Triebs ab. Die Längenmessung wird somit mit zunehmender Länge des zu messenden Pflanzenteils immer ungenauer. In diesem Fall ist, wie beschrieben, die Verwendung von NURBS zur Markierung des zu erfassenden Triebes sinnvoll.

In Abbildung 41 werden die Genauigkeiten dieser einzelnen Messalternativen anhand des Leittriebes von 20 Buchenpflanzen grafisch dargestellt. Dabei ist auch die mittlere Abweichung der Messvarianten eingezeichnet. Wie Tabelle 21 zu entnehmen ist, ergibt bereits das Aufsummieren der einzelnen Segmentlängen, wie in *PMAnalyse* durchgeführt, durchaus genaue Werte für die Sprosslängen. Die Messwerte weichen um etwa ±1,7 Zentimeter von der händischen Messung ab. Es zeigt sich, dass die im vorangehenden Abschnitt quantifizierten Ungenauigkeiten bei der Messung der einzelnen Segmente sich in der Summe weitgehend ausgleichen. Noch geringer ist die Schwankungsbreite bei NURBS (-0,3 bis +1,1 cm). Sehr ungenau fällt allerdings erwartungsgemäß die direkte Entfernungsmessung zwischen Triebanfangs- und Endpunkt aus. Die Triebläge wurde auf diese Art und Weise bei den vorliegenden Untersuchungen um bis zu 14 Zentimeter unterschätzt.

Tabelle 21: Vergleich der Messergebnisse der photogrammmetrischen mit der händischen Längenmessung - statistische Kennwerte.

Abweichung der Sprosslängenmessung photogrammmetrische Varianten ↔ manuell	**Minimum** (maximale Unterschätzung)	**Maximum** (maximale Überschätzung)	**Standardabweichung**	**Mittelwert** (der Beträge)
Summe der einzelnen Segmentlängen (cm)	-1,6605	1,6673	0,963240	0,880330
Direktverbindung als Gerade (cm)	-14,7240	-0,7870	3,525912	4,049400
Direktverbindung als NURBS (cm)	-0,2866	1,0587	0,378849	0,410308

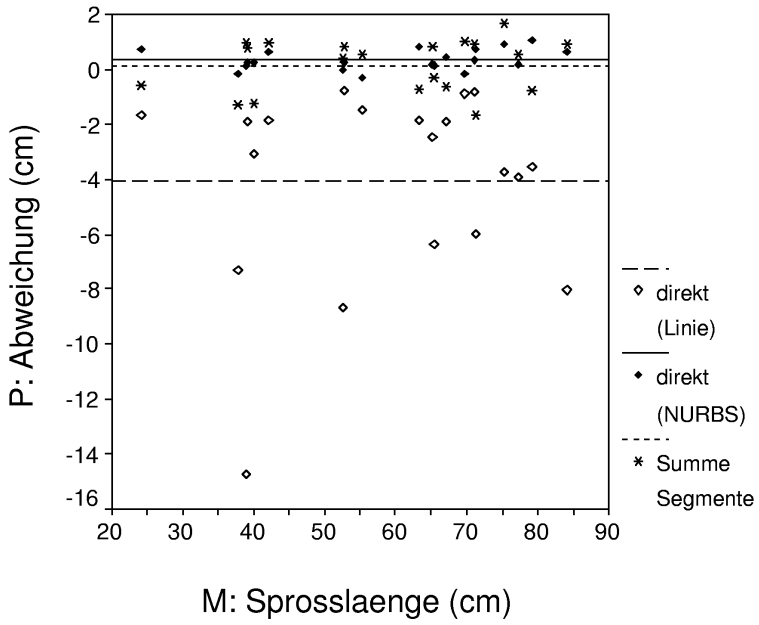

Abbildung 41: Absolute Abweichung der photogrammmetrisch gemessenen Trieblängen (Ordinate) von den händisch gemessenen Werten (Abszisse).

b) Quantifizierung der Ungenauigkeiten bei der Durchmessermessung

Verglichen wird hier die photogrammmetrische Messung mittels Zylinderformen mit der manuellen Vermessung durch zwei um 90° versetzte Messungen mit der Schiebelehre. Bei den Baumpflanzen im untersuchten Alter ist dabei nur in seltenen Fällen eine ausgeprägt exzentrische Form des Sprossdurchmessers vorhanden. Derartige Probleme, wie sie REIDELSTÜRZ (1997, S. 24ff) bei der stereopho-

togrammmetrischen Vermessung von Altbäumen quantifiziert hat, sollen deswegen bei den folgenden Betrachtungen nicht weiter berücksichtigt werden.

Ein Punkt, der allerdings bei der photogrammmetrischen Messung der Sprossdurchmesser ins Gewicht fällt, ist die bereits angesprochene auflösungsbedingte Ungenauigkeit der Digitalkamera. Der Sprossbasis- beziehungsweise Mittendurchmesser beträgt bei Baumpflanzen der untersuchten Größenordnung typischerweise zwischen 0,2 bis gut einen Zentimeter. Wie in den vorangegangenen Abschnitten dargelegt, fällt die niedrige CCD-Auflösung bei der Längenmessung der längeren Wachstumseinheiten, insbesondere im Vergleich zu der ebenfalls ungenauen händischen Messung, weniger ins Gewicht. Die Ungenauigkeiten gleichen sich auf die gesamte Trieblänge bezogen zudem weitgehend wieder aus. Bei den recht geringen Durchmesserwerten wirkt sich der Fehler allerdings wesentlich deutlicher aus. Beim Markieren der Zylinder kommt noch hinzu, dass es sich dabei nicht um einzelne zu kennzeichnende Punkte, sondern um - auf mehreren Bildern - auf beiden Seiten des Sprosses zu markierende Linien handelt (Abbildung 42). Die in diesem Arbeitsschritt unvermeidlichen Ungenauigkeiten haben daher deutliche Auswirkungen auf die photogrammmetrische Triangulation.

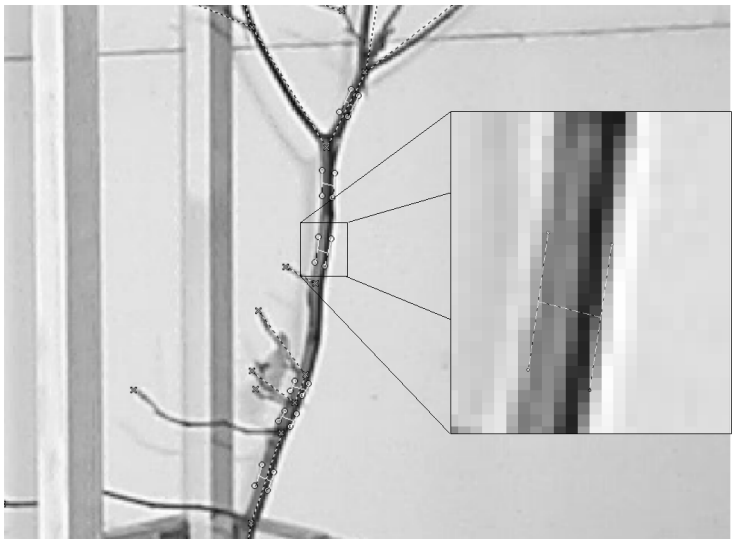

Abbildung 42: Darstellung der auflösungsbedingten Probleme bei der Markierung eines Zylinders zur Durchmessererfassung (am Beispiel des Mittendurchmessers).

Während, wie aus Abbildung 43 (links) hervorgeht, die absoluten Abweichungen der photogrammmetrischen von den händischen Messungen nur geringfügig zwischen -0,88 mm und +3,03 mm schwanken, zeigt die rechte Teilabbildung, dass dies aufgrund der geringen Durchmesser insbesondere in der Sprossmitte deutliche relative Abweichungen bedingt (-18,9% bis +57,0%). Die entsprechenden Zahlenwerte sind Tabelle 22 zu entnehmen.

Es zeichnet sich dabei die Tendenz ab, dass die photogrammmetrische Messung eher zu einer Überschätzung der Durchmesser führt. Die zu geringe Kameraauflösung führt zu einem „Auswaschen“ der Sprosskonturen auf dem Digitalbild, wie auch von CLARK et al. (2000) an digitalen Fotografien von Altbäumen beobachtet und insbesondere in der Vergrößerung von Abbildung 42 gut sichtbar. Aus diesem Grund erwies sich auch die Vermessung der Astbasisdurchmesser der Seitenäste mit photogrammmetrischen Mitteln als nicht sinnvoll: Gerade im Verzweigungsbereich ist eine Markierung mit Zylindern bei der verwendeten Bildauflösung nur sehr schwer möglich. Aus diesem Grund beschränken sich die Ausführungen auf die Durchmessererfassung am Leittrieb.

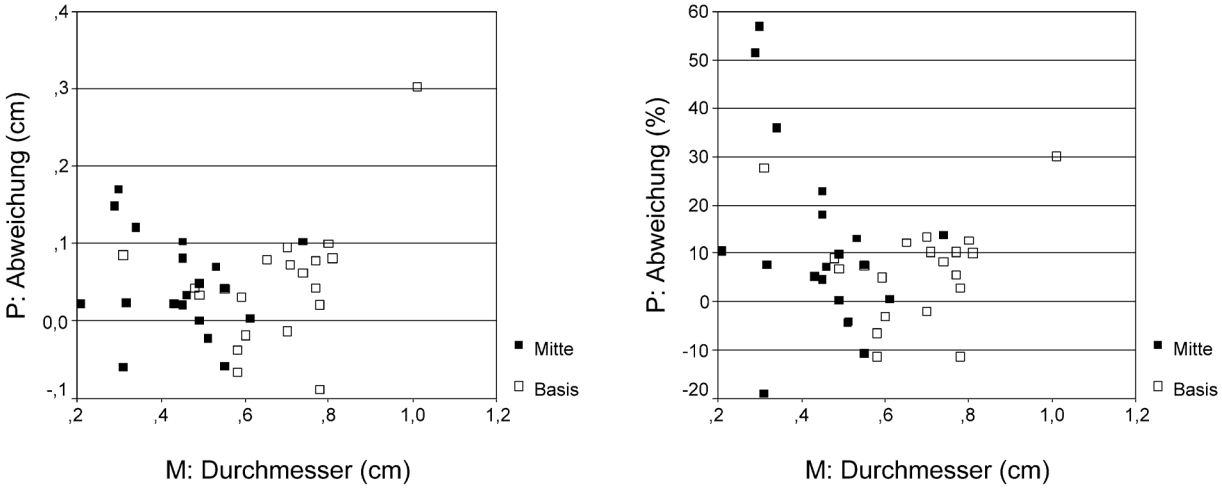

Abbildung 43: Absolute (links) und prozentuale (rechts) Abweichung der photogrammmetrisch als Zylinder erhobenen Triebdurchmesser (Ordinate) von den mittels Schiebelehre gemessenen Werten (Abszisse).

Tabelle 22: Vergleich der Messergebnisse der photogrammmetrischen mit der händischen Durchmessermessung - statistische Kennwerte. B: Sprossbasisdurchmesser, M: Mittendurchmesser.

Abweichung der Durchmessermessungen photogrammmetrische ↔ manuell	**Minimum** (maximale Unterschätzung)	**Maximum** (maximale Überschätzung)	**Standardabweichung**	**Mittelwert** (der Beträge)
B: Abweichung (cm)	-0,0879	0,3021	0,0804211	0,0610845
B: Prozentuale Abweichung (%)	-11,3310	29,9109	10,606345	7,158053
M: Abweichung (cm)	-0,0587	0,1710	0,0637900	0,0485720
M: Prozentuale Abweichung (%)	-18,9355	57,0000	18,825403	15,759621

c) Quantifizierung der Ungenauigkeiten bei der Biomasseschätzung

Zur Schätzung der Trockenbiomasse kamen die angesprochenen Formeln von AMMER (2000) zum Einsatz. Als Eingangsparameter hierfür wurden sowohl die aus der manuellen Messung erhaltenen Angaben für Sprosslängen und Durchmesser, als auch die entsprechenden photogrammmetrischen Messwerte verwendet. Diese Schätzwerte wurden in Relation zu den tatsächlichen Werten aus der exakten Wägung der jeweiligen Leittriebe gesetzt. Es ist anzunehmen, dass die bei der verwendeten Auflösung mit deutlichen Ungenauigkeiten behaftete photogrammmetrische Durchmesserermittlung einen negativen Einfluss auf die Genauigkeit der Schätzformel hat. Deswegen wurde als weitere Alternative eine Biomasseschätzung anhand der photogrammmetrischen Sprosslängenmessung, aber der manuell ermittelten Durchmesserwerte vorgenommen. In Abbildung 44 wird die Abweichung der jeweiligen Schätzwerte vom tatsächlichen Gewicht grafisch dargestellt, die zugehörigen statistischen Kennwerte sind wiederum der folgenden Tabelle zu entnehmen.

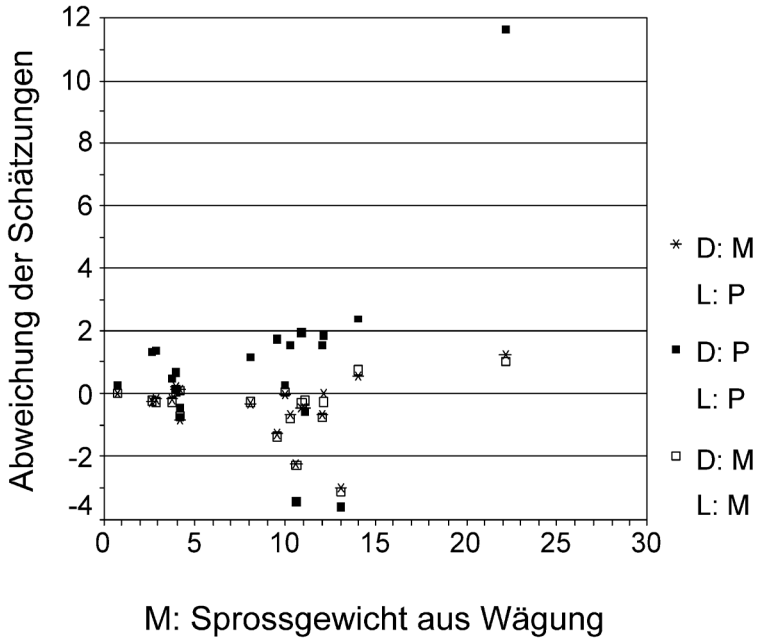

Abbildung 44: Abweichung der geschätzten Biomassewerte für die Haupttriebe von den gewogenen Werten. D: M/P = manuelle beziehungsweise photogrammmetrische Durchmessermessung; L: M/P = manuelle beziehungsweise photogrammmetrische Trieblängenmessung.

Tabelle 23: Vergleich der Messergebnisse der Biomasseschätzung unter Verwendung photogrammmetrisch beziehungsweise manuell erhobener Eingangsparameter.

Abweichung der Biomasseschätzungen Eingangsparameter	**Minimum** (maximale Unterschätzung)	**Maximum** (maximale Überschätzung)	**Standard-abweichung**	**Mittelwert** (der Beträge)
Durchmesser und Länge manuell	-3,1196	1,0109	0,940306	0,804773
Durchmesser und Länge photogrammmetrisch	-3,5848	11,6220	2,973559	2,497072
Durchmesser manuell, Länge photogrammmetrisch	-3,0000	1,2516	1,075735	0,641640

Es ist zu beachten, dass die verwendete Stichprobe an Baumpflanzen zu gering ist, um weitergehende Schlüsse zuzulassen. Es zeigt sich allerdings deutlich, dass eine Schätzung der Biomasse anhand der photogrammmetrischen Werte im vorliegenden Fall an den beschriebenen Ungenauigkeiten bei der Durchmessererfassung scheitert. Daher erscheint auch eine entsprechende Anpassung der verwendeten Formeln vorerst als nicht sinnvoll.

d) Überlegungen zur Berechung der Kronenschirmfläche

Die Kronenschirmfläche wird bei einer konventionellen Vermessung durch Kronenablotungen bestimmt. Üblich sind in der Praxis hierzu, wie bereits angesprochen, acht Messungen (KRAMER und AKÇA, 1995). Von Norden ausgehend wird dazu alle 45° der Kronenradius an dieser Stelle ermittelt. Vergleichbar wird die Kronenschirmfläche beim beschriebenen photogrammmetrischen Verfahren als Polygonzug konstruiert. Im Unterschied zur händischen Messung wird allerdings die photogrammmetrische „Kronenablotung“ nicht jeweils exakt am festgelegten Winkel vorgenommen, sondern es wird der im jeweiligen Sektor am weiten außen liegende Messpunkt verwendet. Dadurch ist eine problemlose Variation des Parameters „Anzahl der Ablotungen“ möglich.

Es ist zu beachten, dass die genaue Ausrichtung nach einer bestimmten Himmelsrichtung beim photogrammmetrischen Verfahren nur dann gegeben ist, wenn das Kalibriergestell vor Beginn der Messung entsprechend ausgerichtet wurde. Dadurch, dass bei den beschriebenen Messungen nur eine relative äußere Orientierung durchgeführt wurde, fehlt den berechneten Objektkoordinaten die Einbindung in ein übergeordnetes Koordinatensystem. Ist eine Vorgehensweise nach Himmelsrichtungen erwünscht, so muss dies bei der Aufstellung des Kalibriergestells beachtet werden (Einnorden zur Herstellung der absoluten äußeren Orientierung).

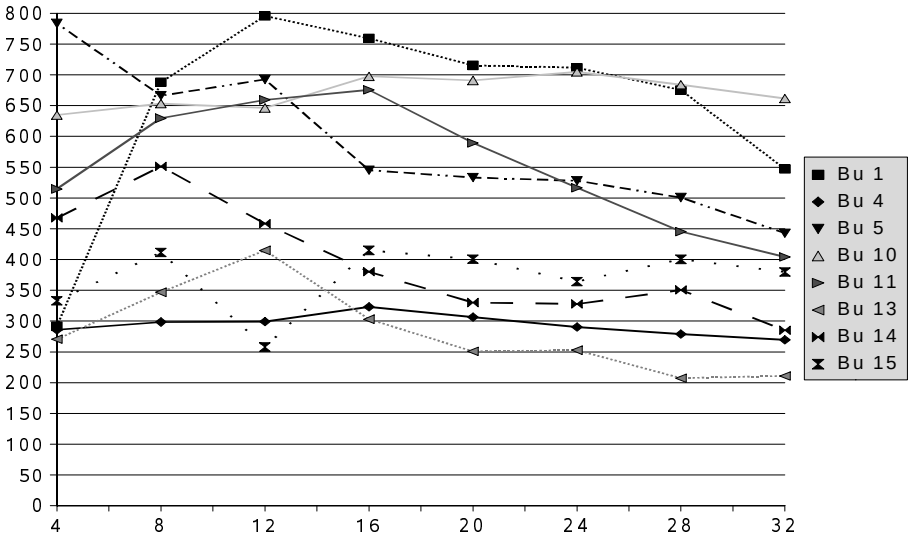

Abbildung 45: Veränderung der berechneten Kronenschirmfläche (in cm²) in Abhängigkeit von der Anzahl der Ecken des verwendeten Polygons (Abszisse).

Abbildung 45 zeigt anhand der berechneten Kronenschirmflächen von acht ausgewählten Buchenpflanzen, dass sich dieser Messwert bei Änderung der Polygongestalt (von vier bis 32 Eckpunkten in Viererschritten, also Messsektoren von 120° bis 11,25°) nur geringfügig ändert. Die Versuchsergebnisse lassen eine ähnliche Aussage auch für den Umfang des jeweils errechneten Polygonzuges zu. In Tabelle 24 sind diese exemplarischen Messwerte für Fläche und Umfang in Listenform zusammengestellt.

Tabelle 24: Abhängigkeit von Kronenschirmfläche (A, cm²) und deren Umfang (U, cm) von der Anzahl der verwendeten Polygoneckpunkte (4 - 32).

Nr	4		8		12		16		20		24		28		32	
	A	U	A	U	A	U	A	U	A	U	A	U	A	U	A	U
1	291,6	92,5	688,0	110,9	795,8	113,6	759,4	118,5	715,5	123,2	711,6	126,1	675,3	125,0	547,1	150,2
4	285,8	68,0	298,4	69,3	299,1	71,7	322,9	72,7	306,5	74,8	290,4	79,1	278,8	84,1	269,6	85,3
5	783,6	119,6	666,2	128,1	692,5	137,1	545,2	157,7	533,1	162,2	528,0	169,4	500,6	175,2	442,8	186,2
10	634,7	101,3	653,1	101,4	646,2	112,4	697,6	113,7	690,9	113,8	704,9	117,7	683,9	119,0	661,5	119,4
11	514,7	97,8	629,5	106,3	659,3	107,2	675,6	116,5	589,5	134,1	516,5	147,6	445,4	165,6	404,2	191,8
13	270,5	66,9	346,7	76,8	414,8	87,7	303,0	102,5	250,8	113,7	252,7	117,5	207,3	133,4	210,9	152,8
14	467,5	107,0	551,2	108,2	458,3	120,6	380,1	134,9	330,0	151,9	327,7	156,6	350,5	166,7	285,0	169,8
15	333,0	97,3	411,6	98,3	257,8	104,2	414,8	108,6	400,5	111,7	364,2	118,3	400,3	127,5	379,9	127,6

3.3.3 Zeitliche Aspekte

In den vorangehenden Abschnitten wurden mehrere Alternativen vorgestellt, Baumpflanzen mittels der Mehrbildtriangulation zu erfassen. Der Zeitaufwand für die beschriebenen Messungen ist dabei sehr unterschiedlich und nicht nur insbesondere abhängig von der Komplexität des Messobjekts, sondern auch von der angewandten Vorgehensweise: Je nachdem, welcher Messumfang (einzelne Wachstumseinheiten oder gesamte Trieblängen) und welche Messmethode (Geraden oder NURBS) gewählt werden, variiert auch der nötige Zeitaufwand. Diese Zusammenhänge werden auch in der folgenden Tabelle deutlich, in der die Messzeiten für die einzelsegmentweise Vermessung mit Geraden der Vermessung ganzer Triebe als NURBS gegenübergestellt werden. Als Anhalt für die Größenordnung der vermessenen Pflanzen ist dabei die aus der manuellen Vermessung erhaltene Länge des Haupttriebes mit angegeben. Nicht mit in die Tabelle aufgenommen wurden die Zeiten für das Fotografieren.

Tabelle 25: Zeitaufwand für die Vermessung von Buchenpflanzen in *Photomodeler Pro* in Minuten. '-' kennzeichnet nicht erfasste Werte beziehungsweise nicht durchgeführte Messvarianten.

Nr.	Länge Leittrieb (cm)	Vorbereitung der Vermessung (min)	Photogramm. Vermessung aller Wachstumseinheiten als Geraden (min)	Photogramm. Vermessung des Leittriebs und der Seitentriebe 1. Ordnung als NURBS (min)
1	65,4	5,6	155	38
2	38,9	4,1	-	23
4	37,7	7,3	61	31
5	79,2	6,1	147	39
7	40,1	3,1	64	-
8	75,3	4,8	135	-
10	71,3	4,2	153	34
11	71,1	5,7	168	42
13	52,7	7,9	123	-
14	52,5	5,5	72	-
15	69,7	7,1	136	-
16	63,3	4,4	85	-
17	55,3	-	63	-
18	84,2	5,7	142	-
19	77,4	3,4	119	47
20	39,1	4,8	67	-

Unter dem Punkt „Vorbereitung der Vermessung“ sind die Anlage eines geeigneten *Photomodeler Pro*-Projektes sowie das Markieren und Referenzieren der Kontrollpunkte zusammengefasst. Die Zeitdauer dieser Arbeitsschritte ist unabhängig von der Komplexität der Baumstruktur oder der gewählten Messvariante. Die angeführten Zeiten umfassen zudem nur Baumpflanzen, bei denen die zu vermessenden Punkte in einem Zug fehlerfrei erfasst werden konnten. Wie bereits angedeutet, führen Fehlern in der Referenzierung zu teilweise erst viel später zu Tage tretenden Problemen und bedingen daher eine zeitaufwändige Fehlersuche. In vielen Fälle stellte es sich in derartigen Fällen als sinnvoll heraus, die Referenzierung komplett von vorne zu beginnen. Dadurch verlängern sich die Messzeiten deutlich.

3.4 Schlussfolgerungen

3.4.1 Diskussion der Datenerhebung

In den vorangehenden Abschnitten wurden mehrere mögliche Einsatzvarianten der Mehrbildtriangulation bei der Erfassung von Baumpflanzen vorgestellt. Durch Messmöglichkeiten zur räumlichen Erfassung von Einzelpunkten, Geraden, NURBS und Zylinderformen bietet diese photogrammmetrische Vorgehensweise prinzipiell die Möglichkeit, auch an komplexen Messobjekten zahlreiche Strukturparameter absolut berührungsfrei zu erheben. Die Messmethodik und damit auch der notwendige Aufwand können entsprechend den Ansprüchen an das zu erhebende Datenmaterial angepasst werden. Vor Ort ist dazu - außer einer handelsüblichen Digitalkamera - nur ein geeignetes Kalibriergestell oder eine ähnliche Vorrichtung notwendig. Auf langwierige Außenaufnahmen kann somit verzichtet werden, was durch Einsparung von unter anderem Reisekosten einen erheblichen Vorteil bedeuten kann.

Als weiterer wichtiger Vorteil ist die Möglichkeit zu sehen, das Bildmaterial lediglich aufzunehmen und für eine spätere Verwendung zu archivieren. Die eigentliche Messung erfolgt nicht direkt am Objekt, sondern anhand dessen Fotos, und kann deswegen zu einem beliebigen Zeitpunkt durchgeführt werden. Dies ist gerade auch bei Projekten von Vorteil, in denen mehrere Forschergruppen zeitgleich am selben Messobjekt arbeiten. Bereits mit der im Rahmen der Untersuchungen verwendeten, inzwischen als veraltet einzustufenden digitalen Kamera sind dabei, eine sorgfältige Vorgehensweise vorausgesetzt, durchaus hohe und für viele Anwendungsfälle ausreichende Genauigkeiten zu erreichen. Allerdings treten insbesondere bei kleinstrukturierten Objektbestandteilen Probleme beim Markieren der zu messenden Objektbestandteile auf. Ein aktuelleres Kameramodell mit möglichst hoher Auflösung ist deswegen nach Möglichkeit zu bevorzugen. Die insbesondere bei der Durchmessererfassung und der darauf aufbauenden Biomasseschätzung beschriebenen Probleme sollten sich durch eine aktuelle, hochauflösende Digitalkamera deutlich mindern lassen.

Den angesprochenen Vorteilen der Mehrbildtriangulation steht allerdings der Nachteil eines hohen Zeitbedarfs bei der Durchführung der eigentlichen Vermessung am Computer entgegen. Dies gilt insbesondere, wenn jede einzelne Wachstumseinheit erfasst wird. Gerade bei kleineren Strukturen ist hier eine sorgfältige Arbeitsweise erforderlich, da selbst einzelne Fehler das gesamte Messprojekt beeinträchtigen können und die nachträgliche Fehlersuche einen hohen Zeitaufwand bedeutet. Allerdings würden bei einer kompletten Vermessung auch konventionelle Verfahren langwierige Messarbeiten, noch dazu direkt am Objekt, erforderlich machen. Beschränkt man sich wiederum nur auf einzelne Kenngrößen wie zum Beispiel komplette Trieblängen, so ist eine photogrammmetrische Vermessung sehr zügig durchführbar.

Weiterhin scheitert die Photogrammmetrie als optisches Verfahren an schwer einsehbaren Strukturen. Bei den im Mittelpunkt des vorliegenden Projektes stehenden jungen Baumpflanzen im Winterzustand führte diese Einschränkung allerdings kaum zu Problemen. Zudem kann diese Problematik durch eine ausreichende Anzahl von gut gewählten Fotos des Objektes umgangen werden, sofern dieses von mehreren Seiten gut einsehbar ist. Problematisch stellt sich allerdings die Erfassung belaubter Pflanzen dar. Sobald die Strukturen schwer zu erkennen sind, können sie auch nicht mehr photogrammmetrisch vermessen werden. Dieser prinzipbedingte Nachteil der Photogrammmetrie, welcher auch bei dicht stehenden Baumpflanzen eine Erfassung schwer bis unmöglich machen dürften, muss bei Untersuchungen stets berücksichtigt werden.

3.4.2 Diskussion des Ansatzes zur Strukturanalyse

Eine reine Erfassung der Baumdaten würde dem Ziel einer strukturellen Analyse nicht gerecht werden. Um diese zu realisieren, wurden daher eine Architektursyntax und entsprechende Auswerteroutinen für 3D-Pflanzenmodelle entwickelt. Dieses Strukturmodell zeichnet sich dadurch aus, dass die hierarchischen Daten von baumartigen Pflanzen damit einfach, aber effektiv und nachvollziehbar gehandhabt werden können. Das Konzept wurde von vorneherein auf eine einfache Implementierbarkeit in Software hin ausgelegt. Die zugehörige Auswertesoftware *PMAnalyse* ist, wie bereits angesprochen, als „proof-of-concept" für dieses Architekturmodell anzusehen. Sie in der vorliegenden Form nicht dazu gedacht, den Ansprüchen, welche an ein Programm für den Endanwender zu stellen sind, gerecht zu werden, sondern dient als Beispielimplementation für die entwickelten Algorithmen.

Als hauptsächlicher Nachteil der Auswertesoftware ist es anzusehen, dass für die Auswertung nur die Geometriedaten direkt aus dem photogrammmetrischen Messprogramm übernommen werden können. Die zugehörige hierarchischen Einstufung der einzelnen Wachstumseinheiten muss in der gegenwärtigen Fassung noch manuell vorgenommen werden. Mit diesem Problem haben auch andere Ansätze der räumlichen Erfassung von Bäumen zu kämpfen, sofern sie sich nicht ohnehin nur, wie meist der Fall, auf das Abgreifen einzelner räumlicher Informationen ohne Einbeziehung der Topologie beziehungsweise eine einfach zu realisierende Visualisierung beschränken.

SINOQUET et al. (1997) lösten diese Problematik dadurch, dass die Topologie parallel zur Geometrie unter Verwendung spezieller Software erhoben wurde. Allerdings muss in diesem Fall die Datenerfassung nach einem genau definierten Schema ablaufen, es besteht bei der Erfassung kein Freiraum und auch nur wenig Fehlertoleranz. Denkbar ist zum Beispiel eine standardisierte Erfassungsreihenfolge der Messpunkte, beginnend mit dem Sprossbasispunkt, mit vorgegebenen Verfahrensweisen bei der Markierung von Verzweigungspunkten und beim Erreichen der Triebspitzen. Eine derart schematisierte Erfassungsreihenfolge ist aber bei der Mehrbildtriangulation schwer einzuhalten, da die Vorgehensweise hier durch die Sichtbarkeit der jeweils zu erfassenden Messpunkte auf den einzelnen Bildern vorgegeben wird.

Aussichtsreicher erscheint ein anderer Ansatz der automatisierten Topologie-Zuordnung: Vom Ursprungssegment (H1 = 1), genau genommen vom Sprossbasispunkt (niedrigste z-Koordinate) aus wird der Baumverlauf analysiert und alle Folgesegmente nach bestimmten Regeln einteilt. Denkbar sind hier Kriterien wie zum Beispiel der Verzweigungswinkel: Die Regel würde in diesem Fall lauten, dass beim Vorhandensein zweier oder mehrerer Nachfolgersegmenten dasjenige, welches die geringste Abweichung vom Winkel des Ursprungssegment hat, die Fortsetzung auf derselben Hierarchieebene darstellt, alle anderen wären als Seitenäste anzusehen. Die entwickelte Architektursyntax würde aufgrund ihrer logischen Struktur gute Ausgangsvoraussetzung für eine derartige Automatisierung bieten.

Die tatsächliche Umsetzung derartiger Regeln erwies sich allerdings als komplex, da neben diesen einfachen Regeln zahlreiche Sonderfälle zu beachten sind. Deshalb wurde für die vorliegende Studie zunächst darauf verzichtet und lediglich eine manuelle Zuordnung der Topologiedaten zu den photogrammmetrisch erfassten Geometriedaten durchgeführt. Anhand der von der *Photomodeler Pro* gelieferten 3D-Modelle der Pflanzen lässt sich auch diese sozusagen teilmanuelle Vorgehensweise verhältnismäßig schnell durchführen.

Sind hierarchische und geometrische Informationen vorhanden, so kann *PMAnalyse* damit zahlreiche Parameter der Pflanze, sowohl auf einzelne Wachstumseinheiten als auch auf globale Pflanzen-

daten hin bezogen, berechnen. Die vorgestellten Algorithmen sind dabei nur als Beispiel zu sehen, je nach Bedarf können auch weitere Informationen gewonnen werden. Beispielsweise ist hier an die Berechnung zu denken, in welchem Jahr ein bestimmte Wachstumseinheit ausgetrieben ist: Dieser Wert lässt sich durch Addieren sämtlicher Hierarchiewerte (H1-Hx, ausgenommen Subindices) des Segmentes schätzen.

In der vorliegenden Fassung sind die Routinen allerdings noch nicht auf alle Eventualitäten hin ausgelegt, daher gibt Anhang B einen Überblick über bestimmte Punkte, die bei der Anwendung des Programmes zu beachten sind. Weiterhin bietet das vorliegende Grundgerüst Raum für Verbesserungen und ergänzende Funktionalitäten. Vorrangig ist hierbei natürlich eine Benutzeroberfläche mit grafischer Darstellung der erfassten Sachverhalte zu nennen, was die Bedienbarkeit sowie die Ergebnisdarstellung in vielen Anwendungsfällen deutlich verbessern würde.

3.4.3 Ausblick

Ein erster praktischer Einsatz des entwickelten Verfahrens erfolgt zum Zeitpunkt der Abfassung dieser Arbeit am Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung im Rahmen des ZEUS-Projektes, dessen Ziel die Entwicklung eines zukunftsorientierten Entscheidungsunterstützungssystems für den Waldbesitzer ist (SPANGENBERG, 2001). An mehreren hundert Jungpflanzen (vorwiegend Nadelbaumarten), welche von den im Rahmen dieses Projektes angelegten Versuchsflächen geerntet wurden, werden auf photogrammmetrische Weise diverse Parameter wie zum Beispiel Trieb- und Wurzellängen räumlich vermessen.

Über die vorgestellte Vermessung von Baumpflanzen hinaus lässt sich ein Einsatz der Mehrbildtriangulation auch bei zahlreichen anderen forstlichen Problemstellungen vorstellen: So sind zum Beispiel Messungen an Altbäumen denkbar (HENDRICH, 1997), im Falle einer Strukturanalyse allerdings nicht so fein aufgelöst wie bei den Jungpflanzen beschrieben. Durch eine Aufteilung des Schaftes in Zylinder sind dabei auch weitergehende Volumenmessungen an diesen wirtschaftlich interessanten Bestandteilen des Baumes möglich (ähnlich wie bei HENGL et al., 1997). Neben der Vermessung von Einzelbäumen sind photogrammmetrische Vorgehensweisen auch zum Beispiel beim Einmessen von Stichprobenpunkten, unter Einsatz von Fluchtstäben als Kontrollpunkten, denkbar. Erste Untersuchungen in diese Richtung haben durchaus verwertbare Resultate ergeben. Es bietet sich hierzu eine Vorgehensweise analog zu den von REIDELSTÜRZ (1997) beschriebenen Untersuchungen bei der Stereobildauswertung an.

Neben diesem weiteren Einsatzspektrum ist in Zukunft auch mit Verbesserungen der Methodik an sich zu rechnen: Durch die Weiterentwicklung der Technologie der Digitalfotografie, insbesondere bezüglich der Kameraauflösung, und durch verbesserte Algorithmen zur automatischen Referenzierung sind effektivere und genauere, besser automatisierbare Verfahren zu erwarten.

Natürlich muss aber auch festgehalten werden, dass die photogrammmetrische Triangulation nicht für jeden Messzweck die geeignete Methode ist. In vielen Situationen erlaubt eine konventionelle, händische Messung eine problemlosere Erfassung der gewünschten Daten. Die Eignung der Photogrammmetrie für eine bestimmte Messaufgabe muss deswegen für den Einzelfall geprüft werden. Gerade wenn aber die rasche Erfassung und Archivierung eines Momentzustandes und eine absolut kontaktlose Analyse gefordert ist, sollte die Mehrbildtriangulation in die Überlegungen zu einem geeigneten Messverfahren einbezogen werden.

IV Empfehlungen für den praktischen Einsatz zerstörungsfreier räumlicher Messmethoden

1. Wahl eines geeigneten Verfahrens

In den vorangehenden Kapiteln wurden unterschiedliche Möglichkeiten vorgestellt, räumliche Messungen an Bäumen und anderen Pflanzen vorzunehmen. Neben zahlreichen anderen Methoden, von denen bislang nur wenige für derartige Anwendungsbereiche adaptiert worden sind, wurden insbesondere der Silhouettenschnitt und die Mehrbildtriangulation im Detail beschrieben. Es stellte sich dabei heraus, dass keines der potentiell einsetzbaren Verfahren für alle Anforderungsprofile im Rahmen der Baumvermessung gleichermaßen geeignet ist. Vielmehr müssen in den meisten Fällen Kompromisse eingegangen werden, beziehungsweise je nach Messziel unterschiedliche, angepasste Messvarianten angewendet werden. Eine allgemeine, universell einsetzbare Lösung zur Erhebung aller relevanten Daten in ihrem räumlichen Zusammenhang existiert also noch nicht, auch wenn diverse vielversprechende technische Ansätze zu erkennen sind.

Es bleibt zudem festzuhalten, dass für den alltäglichen Einsatz in der praktischen Forstwirtschaft die bislang gebräuchlichen, meist händischen Messmethoden in vielen Fällen ausreichend sind. Moderne 3D-Messverfahren bringen in speziellen Anwendungsfällen Vorteile, bei denen die zusätzlich erhaltenen Informationen beziehungsweise die erhöhte Messgenauigkeit benötigt werden. Hier sind in erster Linie, aber nicht ausschließlich, wissenschaftliche Fragestellungen zu nennen. Die Vorteilhaftigkeit eines modernen 3D-Messverfahrens ist somit je nach der Zielsetzung der konkreten Messung für den Einzelfall kritisch zu prüfen.

Die Ausführungen in dieser Arbeit können und wollen daher keine allgemein gültigen Empfehlungen geben. Aufgrund der vielfältigen Ziele einer 3D-Baumvermessung einerseits und der divergierenden Möglichkeiten und Grenzen der unterschiedlichen Messverfahren andererseits werden pauschalierende Aussagen der komplexen Thematik nicht gerecht. Vielmehr sollen einem Forscher, welcher sich mit der Problematik einer dreidimensionalen Erfassung von Baumdaten beschäftigt, mit der vorliegenden Studie Entscheidungshilfen für die Auswahl eines für die jeweilige Problematik geeigneten Verfahrens zur Verfügung gestellt werden. Im Folgenden werden die diesbezüglichen Ergebnisse problemorientiert zusammengefasst.

- Grundsätzlich ist zu entscheiden, ob im Rahmen der Baumvermessung lediglich Struktur- oder aber vollständige Körperdaten gewonnen werden sollen. Strukturdaten stellen dabei das deutlich einfacher zu erfassende und zu bearbeitende Datenmaterial dar: Zur Vermessung bieten sich in diesem Fall Schall- und Magnetfeldmessungen sowie die Mehrbildtriangulation an. Bei der aufwändigeren Erfassung von kompletten Volumenmodellen, gegebenenfalls inklusive Oberflächendaten, kommt neben relativ teuren tomographischen Verfahren theoretisch auch der Silhouettenschnitt in Frage. Momentan erweist sich jedoch noch die mangelnde Verfügbarkeit fehlerfreier Software und leistungsfähiger Computerhardware als der limitierende Faktor für den praktischen Einsatz dieses Verfahrens. Erst wenn diese Vorbedingungen erfüllt sind, können eine weitere Evaluierung vorgenommen und konkrete Empfehlungen für den praktischen Einsatz gegeben werden.

- Weiterhin muss geklärt werden, inwieweit die Fähigkeit, verdeckte Bestandteile des Messobjektes erfassen zu können, für die Messung von Bedeutung ist. Dies stellt insbesondere bei belaubten Baumpflanzen sowie im Dichtstand (Dickung) ein wesentliches Hindernis für die Datenerfassung dar. Die Tomographie, mit der auch Informationen zum Pflanzeninneren gewonnen werden können, bereitet in solchen Fällen am wenigsten Probleme. Alle optischen Verfahren hingegen haben in diesem Fall prinzipbedingt Schwierigkeiten, teilweise ist eine Erfassung unter diesen Umständen vollkommen unmöglich. Die Mehrbildtriangulation kann diesen Nachteil zwar durch die Verwendung mehrerer, frei wählbarer Kamerapositionen in gewissem Maße kompensieren. Bei komplexen Überschneidungen und insbesondere bei Laubbäumen im Sommerzustand können allerdings, wenn überhaupt, deutlich weniger Details erfasst werden, als dies bei den im Rahmen der vorliegenden Arbeit vermessenen unbelaubten Buchen praktiziert wurde. In solchen Fällen können Schall- und Magnetfeldmessungen als gangbare, aber arbeitsintensive Messalternativen für Strukturmessungen dienen.

- Muss im Rahmen der Messungen ein aktueller Zustand rasch für spätere, ausführliche Auswertungen archiviert werden, so ist bevorzugt ein photogrammmetrisches Verfahren, insbesondere die Mehrbildtriangulation, in Betracht zu ziehen. Kein anderes Verfahren bietet bezüglich einer möglichst kurzen Arbeitsdauer direkt am Messobjekt ähnliche Vorteile. Dies ist auch als Vorteil zu werten, wenn mehrere Forschergruppen an einem Objekt arbeiten, wie dies zum Beispiel im Sonderforschungsbereich 607 der Fall ist. Die Auswertungen können auf diese Weise unabhängig voneinander am gespeicherten Bildmaterial vorgenommen werden.

- Bei der Auswahl eines adäquaten Messverfahrens ist zudem immer der finanzielle Aufwand zu betrachten. Von diesem Standpunkt aus ist die Mehrbildtriangulation das Messverfahren mit der günstigsten Kosten-/Nutzen-Relation. Handelsübliche, preiswerte Hard- und Software reicht für die Messungen im Wesentlichen aus. Zudem sind die verwendeten Gerätschaften auch für andere Zwecke, nicht nur im Bereich der Vermessung, einsetzbar. Die anderen vorgestellten Verfahren, insbesondere die Tomographie, benötigen spezielle und entsprechend teure Gerätschaften (Größenordnung von 10.000 bis mehreren 100.000 EUR), was für den praktischen Einsatz oftmals als Ausschlusskriterium anzusehen ist.

Neben den Vorüberlegungen zur Methodik der Datenerfassung sind weiterhin bei jedem Messprojekt auch Überlegungen zur Weiterverarbeitung der gewonnenen 3D-Daten anzustellen. Alle vorgestellten Verfahren liefern ihre Ergebnisse zwar in standardisierten Datenformaten, so dass einzelne geometrische Messwerte mit gängiger CAD-Software abgegriffen werden können. Sollen aber weitergehende Aussagen insbesondere zur Pflanzentopologie gemacht werden, ist für diesen Anwendungsfall spezielle Software notwendig. Für die Auswertung von Strukturdaten wurde dazu im Rahmen dieser Arbeit ein Verfahren entwickelt, welches als Grundlage für derartige Auswertungen dienen kann.

2. Einsatz der Mehrbildtriangulation

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurde ein auf der Mehrbildtriangulation basierendes Verfahren zur dreidimensionalen Strukturerfassung entwickelt und im Detail vorgestellt. Daher sollen an dieser Stelle, basierend auf den während dieser Untersuchungen gewonnenen Erfahrungen, einige An-

merkungen zum praktischen Einsatz dieser Vorgehensweise bei der Vermessung von Pflanzen zusammengefasst werden.

Bezüglich der zu verwendenden Kameratechnik ist anzumerken, dass beim momentanen Stand der Technik der Einsatz einer Digitalkamera der analogen Fototechnik vorzuziehen ist. Fotos können so problemlos und ohne zusätzliche Kosten in ausreichender Anzahl gemacht werden, die Weiterverarbeitung am Computer erfolgt ohne zeitraubende Zwischenschritte. Selbst das verwendete Kameramodell aus der technisch bereits überholten 1,5-Megapixel-Klasse lieferte in vielen Fällen bereits ausreichende Genauigkeiten. Bei Messvorhaben in größerem Umfang sollte dennoch unbedingt auf den Einsatz von Kameras mit mindestens vier Megapixel Auflösung geachtet werden. Aktuelle Modelle (Anfang 2002) sind in der Regel ohnehin mit derartigen hochauflösenden CCD-Chips ausgestattet und weisen daher ausreichende Reserven für exakte Markierungsvorgänge auch bei kleinen Objektbestandteilen auf. Insbesondere bei der Erfassung des Durchmessers und der Biomasseschätzung ist diese erhöhte Messgenauigkeit auch dringend notwendig.

Als essentielles Zubehör für die Fotoaufnahmen hat sich das selbst gefertigte, würfelförmige Kalibriergestell erwiesen. Sofern auf eine sorgfältige und genaue Anfertigung geachtet wird, können auf diese Weise die notwendigen Kalibrierungsvorgänge schnell und standardisiert durchgeführt werden. Die Größe des Gestells sollte dabei passend zur zu erfassenden Pflanze gewählt werden. Im Falle der Vermessung größerer Bäume ist alternativ auch die Verwendung entsprechend eingemessener Fluchtstäbe denkbar.

Weiterhin ist es bei der Fotoauswertung oftmals vorteilhaft, für ein geeignetes Umfeld in Form eines zum Messobjekt kontrastierenden Hintergrundes zu sorgen. Dies ist insbesondere bei Aufnahmen im Gelände, also bei meist sehr inhomogenem Bildhintergrund, eine unabdingbare Voraussetzung für zügiges und fehlerfreies Arbeiten. Als völlig ausreichend für diesen Zweck haben sich weiße Laken erwiesen, gegebenenfalls kann auf diese Weise auch der Boden abgedeckt werden. Bei Messungen unter Laborbedingungen kann auch auf spezielle Dia-Leinwände zurückgegriffen werden. Die Beschichtung reflektiert in diesem Fall den Kamerablitz leicht, das Messobjekt hebt sich so deutlich vom hellen Hintergrund ab.

Als Arbeitserleichterung bei Messungen an getopften Pflanzen kann das Fotografieren durch Verwendung eines Drehtellers für Pflanze und Kalibriergestell, wie im Text beschrieben, weiter rationalisiert werden. Die Kamera bleibt in diesem Fall für die Aufnahmen ortsfest auf einem Stativ.

Software für die Durchführung der photogrammmetrischen Vermessung mittels Mehrbildtriangulation ist von verschiedenen Herstellern auf dem Markt. Das verwendete Programm *Photomodeler Pro 4* hat sich zum einen aus Kostengründen, zum anderen aufgrund vorhandener Zusatzfunktionen (NURBS, Zylindermarkierung), welche auch gut für die Pflanzenvermessung genutzt werden können, bewährt. Diese Techniken beruhen zum Teil auf patentierten Verfahren des Software-Produzenten.

Die konkrete Vorgehensweise bei der photogrammmetrischen Vermessung am Computer kann der Vermessende den Messumständen entsprechend wählen. Nach dem Markieren der Kontrollpunkte ist es jedoch in jedem Fall empfehlenswert, das Messprojekt öfters berechnen zu lassen und die entstehenden 3D-Modelle visuell zu prüfen, um eventuelle Fehler rechtzeitig erkennen und beheben zu können.

3. Ausblick

In den vorangegangenen Kapiteln wurde bereits des öfteren angemerkt, dass der Bereich der 3D-Erfassung ein sich dynamisch entwickelnder Marktsektor ist. Der rasante technische Fortschritt kann dazu führen, dass Verfahrensweisen, welche in der vorliegenden Arbeit noch aus Kapazitäts- oder finanziellen Gründen als ungeeignet bewertet wurden, innerhalb weniger Jahre zu praktikablen und kostengünstigen Messverfahren werden.

Gerade bei den schwerpunktmäßig behandelten photogrammmetrischen Verfahren lässt sich diese Tendenz beobachten: Im Zeitraum der Abfassung dieser Arbeit verdreifachte sich die typische Auflösung einer Standard-Digitalkamera. Die Digitalfotografie ist dabei, die analoge Technik auch aus professionellen Anwendungsfeldern, in denen höchste Genauigkeit gefordert ist, zu verdrängen. Dies hat auch entscheidende Auswirkungen auf die Eignung dieser Technologie für photogrammmetrische Einsatzzwecke.

Weiterhin entwickelt sich auch die Leistungsfähigkeit der zur Datenbearbeitung eingesetzten Computer schnell weiter. Ein Verfahren wie der Silhouettenschnitt, welches zum Zeitpunkt der Untersuchungen im Einsatz bei der Vermessung hauptsächlich aufgrund mangelnder Computerleistung beziehungsweise fehlerhafter Software scheiterte, kann so über kurz oder lang zu einer interessanten Alternative für die Vermessung von Baumpflanzen werden. Durch die Kombination anspruchsvoller Bilderkennungsalgorithmen auf entsprechend leistungsfähiger Hardware sind aber auch in der Mehrbildtriangulation Verbesserungen zu erwarten. In erster Linie ist hier an zuverlässige automatische Referenzierungsfunktionen und ähnliche Arbeitserleichterungen zu denken.

Das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Verfahren bietet die Möglichkeit, ohne großen finanziellen und zeitlichen Aufwand vor Ort wichtige Messgrößen von Pflanzen zu gewinnen, zu speichern und zu analysieren. Wenn das Problem des Hintergrundes gelöst ist, können bei geeigneter Kameraauflösung auch große Bäume erfasst werden. Weitere Einsatzmöglichkeiten ergeben sich nicht nur bei Obstpflanzen, wie sie im SFB 607 ebenfalls untersucht werden, sondern insbesondere auch bei landwirtschaftlichen Pflanzen, die aufgrund der weniger komplexen Strukturen einen geringeren Messaufwand erfordern. Die vorgestellten Anwendungen sind daher nur als Beispiele für mögliche Einsatzvarianten dieses Verfahrens zu sehen.

V Zusammenfassung

Abstract in Deutsch

Zielsetzung der vorliegenden Arbeit war die Entwicklung eines kostengünstigen Verfahrens zur zerstörungsfreien räumlichen Analyse der Struktur forstlicher Baumpflanzen. Für die dreidimensionale Erfassung von Objektdaten sind in verschiedenen Bereichen der Industrie zahlreiche Verfahren eingeführt. Die meisten davon sind allerdings auf ihre Eignung in der Forstwirtschaft beziehungsweise bei der Pflanzenvermessung noch nicht geprüft worden. Es existieren nur wenige Projekte mit entsprechenden Zielsetzungen. Deswegen wurde im ersten Teil der vorliegenden Arbeit eine Evaluierung existierender Verfahren zur dreidimensionalen Datenerhebung, welche auch für den Bereich der forstlichen Forschung von Interesse sein könnten, vorgenommen. Hierfür wurden zunächst die Verfahren der Schall- und Magnetfeldmessung, die Tomographie, sowie insbesondere die unterschiedlichen aktiven und passiven photogrammmetrischen Verfahren anhand ihrer theoretischen Prinzipien und Einsatzgrundsätze beschrieben und bewertet. Soweit vorhanden, wurden publizierte Untersuchungen zur Erfassung dreidimensionaler Baumdaten an dieser Stelle in die Überlegungen mit einbezogen. Ziel dieser Darstellung war es, einen umfassenden Überblick über den aktuellen Wissensstand zur räumlichen Vermessung von Pflanzen zu geben.

Die Evaluation existierender 3D-Messverfahren ergab, dass viele davon schon aus finanziellen Gesichtspunkten, trotz teilweise prinzipieller Eignung, wenig für den praktischen Einsatz im Forstbereich denkbar sind. Neben Laserscannern und Tomographie ist dies auch für die Stereophotogrammmetrie zu sagen, obwohl diese sich schon für einige forstliche Messaufgaben, darunter auch einfache Messungen an Bäumen, bewährt hat. Verfahren wie Schall- und Magnetfeldmessung sind finanziell weniger aufwändig, scheiden jedoch aufgrund der notwendigen langwierigen Messungen direkt am Objekt aus. Die Evaluierung führte daher zu dem Ergebnis, dass insbesondere zwei photogrammmetrische Verfahren vielversprechende Ansätze zum Erreichen der im Rahmen dieser Arbeit bearbeiteten Messziele darstellen: Silhouettenschnitt und Mehrbildtriangulation.

Im zweiten Hauptteil der Arbeit wurden diese beiden Messmethoden vorgestellt und darauf basierende Verfahren zur Vermessung von Pflanzen entwickelt. Der Silhouettenschnitt erwies sich dabei prinzipiell als besonders vorteilhaft, weil hiermit weitgehend automatisiert vollständige Volumenmodelle inklusive Informationen zur Pflanzenoberfläche gewonnen werden können. Als limitierender Faktor für den tatsächlichen Einsatz in der Praxis stellte sich allerdings die für die komplexen Messobjekte notwendige Rechenkapazität dar. Mit der für die Untersuchungen vorliegenden Hard- und Software-Ausstattung traten aus diesem Grund zahlreiche Probleme auf, die einen Einsatz dieser ansonsten sehr vielversprechenden Methode für die gegebene Aufgabenstellung zum gegenwärtigen Zeitpunkt als nicht praktikabel erscheinen lassen.

Weiterhin wurde ein auf der Mehrbildtriangulation beruhendes Messverfahren entwickelt. Diese Methode ermöglicht es erstmals, Struktur- und einfache Körperdaten von Baumpflanzen mit weitgehend handelsüblicher, preisgünstiger Ausrüstung zerstörungsfrei und kontaktlos zu erfassen und zu analysieren. Die Gewinnung der dreidimensionalen Rohdaten kann dabei weitgehend in Anlehnung an die in anderen Branchen übliche Vorgehensweise erfolgen. Um die Brücke zwischen den durch die photogrammmetrischen Messungen erhaltenen Geometriedaten und den für eine strukturelle Analyse der Pflanze interessanten topologischen Informationen zu schlagen, wurde weiterhin eine effektive Architektursyntax zur Bearbeitung räumlicher Baumdaten, angelehnt an EDV-Datenstrukturen, vorgestellt. Die Implementierung dieses Modelles wurde anhand von konkreten Programmbeispielen in Form einer zu diesem Zweck entwickelten Analysesoftware dargestellt. Diese verdeut-

licht, wie anhand eines 3D-Modells mit den zugehörigen Hierarchiedaten weitergehende Angaben wie Trieblängen, Verzweigungswinkel, Knospenzahl oder Angaben zur Kronenschirmfläche automatisiert gewonnen werden können. Die vorgestellte Mess- und Analysemethodik kann somit als sinnvolle Ergänzung der für forstliche Messungen im Nahbereich verfügbaren Verfahren angesehen werden, um bislang in dieser Form nicht verfügbare räumliche Strukturinformationen zu erheben.

Abstract in English

The presented study was aimed at developing a method for performing non-destructive spatial analysis of the structure of forestal tree plants. In numerous industries three-dimensional measurement of objects is performed with various techniques. Most of these procedures, however, have not yet been tested for the measurement of trees or plants. There are only a few projects pursuing this objective. Therefore, in the first part of this study existing methods for gathering three-dimensional data which could be also interesting for forestal research were evaluated. For this purpose the basic principles of measurement techniques based on magnetic and sonic fields, tomography and especially on optical means were described and analyzed. Publications related to this topic have been included as far as existing. This evaluation had therefore the intention to give the reader a comprehensive overview of the current standard of knowledge concerning the spatial measurement of plants.

This survey of existing three-dimensional measurement methods came to the conclusion that many of these are not applicable for practical day-to-day use because of the necessary expenses, despite being theoretically capable of the given measurement task. This applies especially to laser scanners and tomography, but also to stereo photogrammetry, although this technique has already been employed for measurement in forestry. Sonic and magnet field digitizers are financially less straining, but require protracted field work directly at the object to be measured. Therefore, the survey concluded that two photogrammetric methods, multi-picture triangulation and silhouette cut, are best suited for the measurement tasks dealt with in this study.

The second part of this study described these two techniques and the development of methods for measuring tree plants based on them. Silhouette cut has the advantage of automatically generating complete volume models of the plant including surface information. However, this method requires high capacity hard- and software equipment for dealing with the complex objects. The equipment available for this study was not capable enough, which resulted in severe problems. It had to be concluded that silhouette cut, although promising, is not yet a viable alternative for plant measurement.

Furthermore, a measurement technique based on photogrammetric triangulation was developed. This method makes it possible for the first time to gather and analyze structural information on tree plants by means of budget-priced standard equipment. The digitizing of the three-dimensional raw data can mostly be performed in accordance to industry-standard procedures. Furthermore, in order to make the connection between the photogrammetrically obtained geometric data and the topological information necessary for a structural analysis, an efficient syntax to process spatial tree data based on IT data structures was proposed. The usage of this model was illustrated by means of concrete algorithms. The developed software implementation shows how to obtain results like shoot lengths, branching angles, number of buds or crown projection area based on the 3D tree model and the associated hierarchical data. These results illustrate that multi-picture triangulation can be considered a valuable addition to the methods available for forestal close-range measurement, enabling the researcher to obtain information on spatial structure not available in this form before.

VI Quellenangaben

Literatur

ABW (Hrsg.) (1999): Proceedings zum 6. ABW-Workshop „Optische 3D-Formerfassung“ an der Technischen Akademie Esslingen vom 25.-26.01.1999. Selbstverlag, Frickenhausen. Paper-Sammlung.

AHO, A.V. und ULLMANN, J.D. (1996): Informatik. Datenstrukturen und Konzepte der Abstraktion. International Thomson Publishing Company, Bonn. 1042 S.

AICON (Hrsg.) (1999): Proceedings zum Workshop „Visite 2 - Visitation Programme For Industrial Solutions Of Image Technology Engineering“ am 17.02.1999. Selbstverlag, Braunschweig. Paper-Sammlung.

AMMER, CHR. (2000): Untersuchungen zum Einfluss von Fichtenaltbeständen auf die Entwicklung junger Buchen. Berichte aus der Holz- und Forstwirtschaft. Shaker Verlag, Aachen. 185 S.

BLASCHKE, H.; BREHMER, U. und SCHWARZ, H. (1985): Wurzelschaden und Waldsterben: zur Bestimmung morphologischer Kenngrößen von Feinwurzelsystemen mit dem IBAS - erste Ergebnisse. In: Forstw. Cbl. 104. S. 199-205.

BLEUL, A. (2001): Zellulizium. Kameratechnik - vom Photon zum Foto. In: c't Magazin für Computertechnik 04/2001. S. 160-171.

BÖHM, W. (1979): Methods of Studying Root Systems. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg. 188 S.

BORN, M. (1990): Verfahren zur zerstörungsfreien Abschätzung der Biomasse. In: Beitr. Forstwirtschaft 24:1. S. 40-42.

BURKE, M. K. und LEBLANC, D. C. (1988): Rapid measurement of fine root length using photoelectric image analysis. In: Ecology 69:4. S. 1286-1289.

BUTLER, D. A.; FUNCK, J. W. und BRUNNER, C. C. (1993): An adaptive image preprocessing algorithm for defect detection in Douglas-fir veneer. In: Forest Products Journal, 43:5. S. 57-60.

BUTNOR, J.R.; DOOLITTLE, J.A.; KRESS, L.; COHEN, S. und JOHANSEN, K.H. (2001): Use of ground-penetrating radar to study tree roots in the southeastern United states. In: Tree Physiology 21(17). S. 1269-1278.

CAMPAGNA, S. und KOBBELT, L. (1998): Dreiecksbeziehungen. Effiziente 3D-Darstellung durch hierarchische Polygonmodelle. In: c´t Magazin für Computertechnik 16/1998. S. 174-177.

CLARK, N.A.; WYNNE, R.H.; SCHMOLDT, D.L. und WINN, M. (2000): An assessment of the utility of a non-metric digital camera for measuring standing trees. In: Computers and Electronics in Agriculture 28. S. 151-169.

DANJON F.; SINOQUET, H.; GODIN, C.; COLIN, F. und DREXHAGE, M. (1999a): Characterisation of structural tree root architecture using 3D digitising and AMAPMod software. In: Plant and Soil 211. S. 241-258.

DANJON, F.; BERT, D.; GODIN, C. und TRICHET, P. (1999b): Structural root architecture of 5-year-old Pinus pinaster measured by 3D digitising and analysed with AMAPMod. In: Plant and Soil 217. S. 49-63.

DANJON, F.; POT, D.; RAFFIN, A. und COURDIER, F. (2000): Genetics of root architecture in 1-year old Pinus pinaster measured with the WinRHIZO image analysis system: preliminary results. In: STOKES, A. (Hrsg.) (2000): The supporting Roots of Trees and Woody Plants: Form, Function and Physiology. Kluwer Academic Publishers, Niederlande. S. 77-81.

DE REFFYE, P.; FOURCAUD, T.; BLAISE, F.; BARTHÉLÉMY, D. und HOULLIER, F. (1997): A Functional Model of Tree Growth and Tree Architecture. In: Silva Fennica 31(3). S. 297-311.

DEHN, R. (1987): Eine integrierte rechnergestützte Methode zur Aufstellung lokaler Sortenmodelle am Beispiel der Baumart Fichte. Dissertation an der Georg-August-Universität Göttingen. 129 S. + Anhang.

DIEBOLT, K. S. und MUDGE, K. W. (1988): Use of a video-imaging system for estimating leaf surface area of Pinus sylvestris seedlings. In: Can. J. For. Res. 18. S. 377-380.

DIMENSION3D SYSTEMS GMBH (1998): Scanware 1.1 für Windows 95/NT4. Selbstverlag, Hannover. 41 S.

DREXHAGE, M.; CHAUVIÈRE, M.; COLIN, F. und NIELSEN, C. (1999): Development of structural root architecture and allometry of Quercus petrea. In: Can. J. For. Res. 29. S. 600-608.

DUWE, H.-P. (1999): Software zur Verarbeitung optisch digitalisierter Punktewolken. In: ABW (Hrsg.) (1999): Proceedings zum 6. ABW-Workshop „Optische 3D-Formerfassung“ an der Technischen Akademie Esslingen vom 25.-26.01.1999. Selbstverlag, Frickenhausen. Paper-Sammlung.

EOS SYSTEMS (2000): Photomodeler Pro User Manual. 21. Auflage. Selbstverlag, Vancouver B.C. 389 S.

FROMM, J.; SAUTTER, IRINA; MATTHIES, D.; KREMER, J.; SCHUMACHER, P. und GANTER, C. (2001): Xylem Water Content and Wood Density in Spruce and Oak Trees Detected by High Resolution Computed Tomography. In: Plant Physiology Vol. 127, S. 416-425.

GAFFREY, D. und SABOROWSKI, J. (1999a): RBS, ein mehrstufiges Inventurverfahren zur Schätzung von Baummerkmalen. I. Schätzung von Nadel- und Asttrockenmassen bei 66-jährigen Douglasien. In: Allg. Forst- u. J.-Ztg. 170. S. 177-183.

GAFFREY, D. und SABOROWSKI, J. (1999b): RBS, ein mehrstufiges Inventurverfahren zur Schätzung von Baummerkmalen. II. Modifizierte RBS-Verfahren. In: Allg. Forst- u. J.-Ztg. 170. S. 223-227.

GJERDRUM, P.; WARENSJÖ, M. und NYLINDER, M. (2001): Classification of crook types for unbarked Norway spruce sawlogs by means of a 3D log scanner. In: Holz als Roh- und Werkstoff 59 (2001) 5. Springer Verlag. S. 374-379.

GODIN, C. und GUÉDON, Y. (1996): Conception d’une méthodologie d'analyse des plantes à l'échelle macroscopique. In: Tendences nouvelles en modélisation pour l'environment. 15.-17.01.1996, CNRS Paris. S. 17-22.

GODIN, C.; COSTES, EVELYNE und CARAGLIO, Y. (1997): Exploring Plant Topological Structure with the AMAPmod Software: An Outline. In: Silva Fennica 31(3). S. 357-368.

GODIN, C.; COSTES, EVELYNE und SINOQUET, H. (1999): A method for Describing Plant Architecture which integrates Topology and Geometry. In: Annals of Botany 84. S. 343-357.

HANAN, J. und ROOM, P. (1997): Practical aspects of virtual plant research. In: MICHALEWICZ, M. T. (Hrsg.): Plants to ecosystems. Advances in Computational Life Sciences. CSIRO, Melbourne. S. 28-44.

HENDRICH, CHR. (1997): Eine photogrammetrische Methode zur Vermessung von Baumkronen. Diplomarbeit am Institut II für Experimental- und angewandte Physik der Universität Regensburg in

Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Ludwig-Maximilians-Universität München. 181 S.

HENGL, T.; KRIŽAN, J. und KUŠAN, V. (1997): STABLO 3D. Program za izmjeru pojedinacnih stabala primjenom terestrice fotogrametrjie [TREE3D. Program for Measurement of Individual Trees Using Close Range Photogrammetry]. In: Mehanizacija Sumarstva 22(3). S. 141-147.

HEROLD, H. (1996): Unix-Systemprogrammierung. Addison-Wesley Verlag Deutschland, Bonn. 817 S.

HOOKER, J. E.; MUNRO, M. und ATKINSON, D. (1992): Vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi induced alteration in poplar root system morphology. In: Plant and Soil, 145:2. S. 207-214.

HRUSKA, J.; CERMÁK, J. und SUSTEK, S. (1999): Mapping tree root systems with ground-penetrating radar. In: Tree Physiology 1999 19: 125-130.

INRA (Hrsg.) (1998): Second International Workshop on Functional-Structural Tree Models. Provisional Programme and Abstract Book. Selbstverlag, Clermont-Ferrand. 95 S. + Anhänge.

JÜRGENS, K. (1998): Im Bilde bleiben. Speicherkonzepte für Digitalkameras. In: c't Magazin für Computertechnik 14/1998. S. 98-99.

KOCH, BARBARA und REIDELSTÜRZ, P. (1998a): Einsatz der terrestrischen Stereophotogrammetrie für forstliche Anwendungen. In: Festschrift Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. mult. Gottfried Konecny zur Emeritierung. Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover, Hannover. S. 163-183.

KOCH, BARBARA und REIDELSTÜRZ, P. (1998b): Terrestrische Stereophotogrammetrie für forstliche Anwendungen. In: AFZ/Der Wald 24/1998. S. 1464-1467.

KRAMER, H. und AKÇA, A. (1995): Leitfaden zur Waldmeßlehre. 3., erweiterte Auflage 1995 (erste Auflage 1982). J. D. Sauerländer´s Verlag, Frankfurt am Main. 266 S.

KRAUS, K. (1996): Photogrammetrie. Verfeinerte Methoden und Anwendungen. Mit Beiträgen von Josef Jansa und Helmut Kager. 3. Auflage. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn. 488 S.

KRAUS, K. (1997): Photogrammetrie. Grundlagen und Standardverfahren. 6. Auflage. Ferd. Dümmlers Verlag, Bonn. 394 S.

KURTH, W. und SLOBODA, B. (1997): Growth Grammars Simulating Trees - an Extension of L-Systems Incorporating Local Variables and Sensitivity. In: Silva Fennica 31(3). S. 285-295.

LE DIZÈS, S.; CRUIZIAT, P.; LACOINTE, A.; SINOQUET, H.; LE ROUX, X. und JACQUET, P. (1997): A Model for Simulating Structure-Function Relationships in Walnut Tree Growth Processes. In: Silva Fennica 31(3). S. 313-328.

LEPETIT, H.; TRIBOULOT, P. und MARTIN, P. (1990): Caracterisation de qualite de surface bois par analyse d´images. Actes du 3eme Colloque Sciences et Industries du Bois, 14-15 Mai 1990, Bordeaux. “De la foret cultivee a l´industrie de demain“. Vol I.. S. 123-132.

MABROUK, H. und SINOQUET, H. (1998): Indices of light microclimate and canopy structure of grapevines determined by 3D digitizing and image analysis, and their relationship to grape quality. In: Australian Journal of Grape and Wine Research 4. S. 2-13.

MAUELSHAGEN, L. (1989): Photogrammetrie in der archäologischen Praxis. In: Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung 57/1989, Heft 3. S. 126ff.

MEYER, C. (1997): Nachgelegt. Speicherkonzepte für kompakte Digitalkameras. In: c't Magazin für Computertechnik 15/1997. S. 198.

MEYER, C. (1998): Eimerweise Pixel. Technik von Bildaufnehmern für Digitalkameras. In: c't Magazin für Computertechnik 14/1998. S. 82-85.

MEYER, C. und BLEUL, A. (2001): Automatische Versager. Grenzen der Bequemlichkeit: Wozu Kamera-Automatiken nicht taugen. In: c't Magazin für Computertechnik 04/2001. S. 172.

NIEM, W. (1994): Robust And Fast Modelling of 3D Natural Objects From Multiple Views. In: SPIE Proceedings „Image And Video Processing II" Vol. 2182, San Jose, Februar 1994. S. 388-397.

NIEM, W. (1997): Error Analysis for Silhouette-Based 3D Shape Estimation from Multiple Views. In: Proceedings of the International Workshop on Synthetic-Natural Hybrid Coding and Three-Dimensional Imaging. 06.-09.09.1997. Rhodos. 4 S.

NIEM, W. (1999): Automatische Rekonstruktion starrer dreidimensionaler Objekte aus Kamerabildern. Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades Doktor-Ingenieur am Fachbereich Elektrotechnik und Informationstechnik der Universität Hannover. 126 S.

NIEM, W. und BROSZIO, H. (1995): Mapping Texture from Multiple Camera Views onto 3D-Object Models for Computer Animation. In: Proceedings of the International Workshop on Stereoscopic and Three-Dimensional Imaging, 06.-08.09.95. Santorini, Griechenland. 7 S.

NIEM, W. und BUSCHMANN, R. (1994): Automatic Modelling Of 3D Natural Objects From Multiple Views. In: Proceedings European Workshop on Combined Real and Synthetic Image Processing for Broadcast and Video Production, 23.-24.11.1994. Hamburg. 12 S.

NIEM, W. und STEINMETZ, M. (1996): Camera Viewpoint Control for the Automatic Reconstruction of 3D Objects. Proceedings ICIP 96 16.-19.09.1996. Lausanne. 4 S.

NIEM, W. und WINGBERMÜHLE, J. (1997): Automatic Reconstruction of 3D Objects Using a Mobile Monoscopic Camera. In: Proceedings of the International Conference on Recent Advances in 3D Imaging and Modelling. 12.-15.06.1997. Ottawa. 8 S.

ODDIRAJU, V.; BEYL, C.A.; BARKER, P.A. und STUTTE, G.W. (1994): Container size alters root growth of western black cherry as measured via image analysis. In: Hort Science, 29:8. S. 910-913.

PLANCHAIS, ISABELLE und SINOQUET, H. (1998): Foliage determinants of light interception in sunny and shaded branches of Fagus sylvatica (L.). In: Agricultural And Forest Meteorology 89. S. 241-253

PRATSCH, S. (1991): Anwendungsmöglichkeiten des fotografischen Systems Elcovision 10 im forstlichen Meß- und Versuchswesen. Diplomarbeit der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München. 105 S.

PRICE, T. V. und OSBORNE, C. F. (1990): Computer imaging and its application to some problems in agriculture and plant science. Critical reviews in Plant Sciences, 9:3. S. 235-266.

PRUSINKIEWICZ, P. und HANAN, J. (1989): Lindenmayer Systems, Fractals, and Plants. Lecture notes in biomathematics 79. Springer Verlag, New York. 120 S.

PRUSINKIEWICZ, P. und LINDENMAYER, A. (1990): The Algorithmic Beauty of Plants. Springer Verlag, New York. 228 S.

PRUSINKIEWICZ, P.; ROOM, P. und HANAN, J. (1996): Virtual Plants – New Perspectives For Ecologists, Pathologists And Agricultural Scientists. In: Trends In Plant Science Januar 1996 Vol. 1 No. 1. Elsevier Science Ltd. S. 33-38

REIDELSTÜRZ, P. (1997): Forstliches Anwendungspotential der terrestrisch-analytischen Stereophotogrammetrie. Inaugural-Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades der Forstwissenschaftlichen Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau. Freiburg i. Br. 256 S + Anhang.

RIEDEL, A. (2000a): Erhebung von dreidimensionalen Daten an Baumpflanzen. In: WOLF, H. (Hrsg.) (2000): Papers zum 7. ABW-Workshop „3D Bildverarbeitung (Optische 3D-Formerfassung) 2000“.

RIEDEL, A. (2000b): Dreidimensionale Vermessung von Baumpflanzen. In: Forstarchiv 71. S. 95-101.

RINK, J. (1999): Maß-Nahme. 3D-Laserscanner von Conrad Electronic. In: c't Magazin für Computertechnik 21/1999. S. 100.

ROOM, P.; HANAN, J. und PRUSINKIEWICZ, P. (1996): Virtual plants: new perspectives for ecologists, pathologists and agricultural scientists. In: Trends in Plant Science Vol. 1, No. 1. S. 33-38.

ROOM, P.; MAILLETTE, L. und HANAN, J. (1994): Module And Metamer Dynamics And Virtual Plants. In: BEGON, M. und FITTER, A. H. (1994) (Hrsg.): Advances in Ecological Research 25/1994. Harcourt Brace & Co. Publishers Academic Press, London. S. 105-157.

SCIENCE ACCESSORIES (Hrsg.) (1996): Freepoint 3D User's Guide And Technical Manual. Selbstverlag, Columbia (Maryland). 78 S.

SEETZEN, R. (1998): Mit klarem Blick: Stärken und Tücken aktueller Digitalkamera-Technik. In: c't Magazin für Computertechnik 14/1998. S. 78-81.

SEETZEN, R. (1999): Pixel-Service. Scan-Dienstleistungen im Vergleich. In: c't Magazin für Computertechnik 22/1999. S. 176-177

SEETZEN, R. (2001): Plastiksonnen. Lichtquellen für die Digitalfotografie: Die Kunst des Kunstlichts In: c't Magazin für Computertechnik 08/2001. S. 232-236.

SEETZEN, R. und LOEBICH, CHR. (1999): Chemische Alternative. Zwei Wege zum digitalen Bild: Digitalkamera oder Spiegelreflex mit Diascanner? In: c't Magazin für Computertechnik 22/1999. S. 158-161.

SEETZEN, R. und STEIN, A. (2000): Viel Platz für kleine Pixel. Aktuelle Speicherlösungen rund um digitale Fotokameras. In: c't Magazin für Computertechnik 8/2000. S. 132-133.

SFB 607 (Hrsg.) (2001): Arbeits- und Ergebnisbericht für SFB-Phase I (01.07.1998-30.06.2001). Selbstverlag, Freising. 493 S.

SILVA FENNICA 31(3) (1997): Special Issue On Functional-Structural Tree Models. Vol. 31(3) 1997. 380 S.

SINOQUET, H. und RIVET, P. (1997): Measurement and visualisation of the architecture of an adult tree based on a three-dimensional digitising device. In: Trees 11. S. 265-270.

SINOQUET, H.; RIVET, P. und GODIN, C. (1997): Assessment of the Three-Dimensional Architecture of Walnut Trees Using Digitising. In: Silva Fennica 31(3). S. 265-273.

SINOQUET, H.; THANISAWANYANGKURA, S.; MABROUK, H. und KASEMSAP, P. (1998): Characterization of the Light Environment in Canopies Using 3D Digitizing and Image Processing. In: Annals Of Botany 82. S. 1-10.

SPANGENBERG, ANDREA (2001): Grundlagen für eine zukunftsorientierte Waldwirtschaft. In: AFZ-Der Wald 6/2001. S. 315-316.

STÖCKER, H. (1995): Taschenbuch mathematischer Formeln und moderner Verfahren. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt am Main. 953 S.

SUGIMORI, M. (1995): Recognition of longitudinal knot area by light reflection and image processing. In: Mokuzai Gakkaishi, Journal of the Japan Wood Research Society 39. S. 1-6.

THANISAWANYANGKURA, S.; SINOQUET, H.; RIVET, P.; CRETENET, M. und JALLAS, E. (1997): Leaf Orientation and sunlit leaf area distribution in cotton. In: Agricultural And Forest Meteorology 86. S. 1-15.

WAGNER, S. (1994): Strahlungsschätzung in Wäldern durch hemisphärische Fotos - Methode und Anwendung. Ber. d. Forschungszentrums Waldökosysteme, Reihe A, Bd. 123. Göttingen. 172 S.

WAGNER, S. und NAGEL, J. (1992): Ein Verfahren zur PC-gesteuerten Auswertung von Fish-eye-Negativfotos für Strahlungsschätzungen. In: Allg. Forst- u. J.Ztg., 163. S. 110-116.

WEBER, J. (1900): Die Photographie im Dienste der Forstwissenschaft. In: AFZ Allgemeine Forst- und Jagdzeitschrift September 1900. S. 301-308.

WOLF, H. (1999): Systematische Zusammenstellung der Projektionstechniken zur strukturierten Beleuchtung. In: ABW (Hrsg.) (1999): Proceedings zum 6. ABW-Workshop „Optische 3D-Formerfassung“ an der Technischen Akademie Esslingen vom 25.-26.01.1999. 10 S.

ZHANG, M.; KAWAI, S. und SASAKI, H. (1994): Production and properties of composite fibreboard. In: Mokuzai Gakkaishi, Journal of the Japan Wood Research Society, 40:8. S. 816-823.

Internet-URLs

Hinweis: Die angegebenen Internet-Adressen stellen den zum Zeitpunkt der Abfassung dieser Arbeit (Januar 2002) aktuellen Stand dar. Aufgrund der ständig wechselnden Inhalte des WWW kann nicht garantiert werden, dass die URLs auch längerfristig gültig sind.

Links zu zitierten Forschungsprojekten

1. http://www.forst.tu-muenchen.de/EXT/SFB607/sfb_607.htm

2. http://www.forst.tu-muenchen.de/EXT/LST/WALDB/mitarbeiter/riedel/riedel.html

3. http://www.cpai.uq.edu.au/

4. http://www.tnt.uni-hannover.de/project/3dmod/

5. http://www.med.harvard.edu/AANLIB/hms1.html

Links zu im Rahmen des Projektes verwendeter Hard- und Software

6. http://www.kodak.de/
   http://www.kodak.com/US/en/digital/genInfo/dc265.shtml

7. http://www.dimension3d.de/
   http://www.interzart.de/[19]

8. http://www.photomodeler.com/

19 Beide Internet-Adressen zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit zeitweise nicht mehr erreichbar.

9. http://www.bentley.de/

10. http://www.autodesk.de/

11. http://www.actify.com/

12. http://www.mingw.org/

Links zu weiteren Herstellern von Photogrammmetrie- und 3D-Erfassungsprodukten

13. http://www.immersion.com/

14. http://www.polhemus.com/

15. http://www.gtco.com/

16. http://www.3d-scan.com/

17. http://www.aicon.de/

18. http://www.rolleimetric.de

Links zum allgemeinen Themen der Computergrafik

19. http://www.apm.tuwien.ac.at/docs/lva/mmgdv/

20. http://ls7-www.cs.uni-dortmund.de/students/projectgroups/acit/acitswing/bspline.shtml

21. http://www.cs.unc.edu/~dm/CODE/GEM/chapter.html

22. http://orca.st.usm.edu/~seyfarth/css334/polygon.html

VII Anhang

Anhang A: Programmfunktionen der Analysesoftware

Der kommentierte Quellcode des Programmes ist vollständig in Anhang C abgedruckt. In Anhang A sollen zunächst die Funktionalität und die Aufrufparameter der einzelnen Programmroutinen beschreibend dargestellt werden.

1. Globale Vorgaben

In den ersten Quellcode-Zeilen werden die notwendigen `#include`-Dateien für den C-Compiler eingebunden sowie die globale Variablen und Konstanten festgelegt. Besonders von Interesse ist dabei unter anderem die Konstante `CROWNPOINTS`, weil hiermit die Anzahl der für die Kronenprojektionsfläche verwendeten Punkte festgelegt wird (vergleiche Abschnitt III.3.2.2.3). Die Konstante `MAXHLEVEL` legt fest, auf wie viele Hierarchieebenen ein Auswertungsdurchgang beschränkt wird. Durch einfache Neukompilation des Quelltextes können deswegen diese wichtigen Parameter den Bedürfnissen des einzelnen Messprojektes angepasst werden.

Die Variable `iderror` dient als Rückgabewert von Programmroutinen im Falle einer Fehlfunktion, während im Gegensatz dazu `idna` bei aus anderen Gründen nicht berechenbaren Werten, zum Beispiel aufgrund nicht erfasster Parameter, verwendet wird. Der Wert von `idfirstseg` wird beim Erreichen des untersten Baumsegment gesetzt. Die Variable `numcp` beinhaltet die Anzahl der von *Photomodeler Pro* verwendeten Kontrollpunkte, also im Normalfall '8'.

Neben dieses Konstanten und Variablen werden in diesen Zeilen zudem die im Hauptteil der vorliegenden Arbeit (insbesondere Abschnitt III.3.2.2.3) ausführlich beschriebenen globalen Datenstrukturen (`COORDINATE`, `SEGMENT`, `VECTOR`, `CROWN`, `TREEDATA`) definiert.

2. Hauptprogramm

Synopsis: `int main(int,char *)`

Funktion: Die wesentliche Funktionalität liegt bei *PMAnalyse* in den anschließend beschriebenen Unterroutinen vor. Das Hauptprogramm dient hauptsächlich als Beispielimplementation. Hier werden zunächst anhand der Aufrufparameter die beiden Eingabedateien geöffnet und die entsprechende Ausgabedateien erzeugt. Nachdem in den anzulegenden Strukturen einige Default-Werte gesetzt wurden, werden die *Photomodeler Pro*-Koordinaten eingelesen und dabei gleichzeitig erste Berechnungsschritte vorgenommen (Feststellen des Sprossbasispunktes und entsprechende Transformation des Koordinatensystems). Anschließend wird auch die Hierarchieliste eingelesen und daraus die Segmentliste durch den Einsatz diverser Unterroutinen (siehe dazu die folgenden Absätze) generiert. Nachdem diese vollständig erstellt worden ist, werden darauf aufbauend gleichermaßen die globalen Baum- und Kronendaten berechnet. Abschließend werden die berechneten Parameter in Listenform ausgegeben und das Programm nach vollständigem Durchlauf einer Messsession beendet.

3. Fehlerroutine

Synopsis: `void errorexit(char *)`

Funktion: Beim Auftreten eines Fehlers bricht diese Routine unter Ausgabe eines entsprechenden Fehlertextes das Programm kontrolliert ab, es wird also nicht mehr zum aufrufenden Programmteil zurückgekehrt. Der Wortlaut der Fehlermeldung wird dabei von der Routine, in der der Fehler aufgetreten ist, übergeben.

4. Zählen der Zeilen in einer Datei

Synopsis: `unsigned int getnumlines(FILE *)`

Funktion: Diese Routine zählt die Zeilen beliebiger Textdateien. Damit dabei Leerzeilen am Schluss, wie dies insbesondere bei den manuell erzeugten CSV-Dateien gelegentlich vorkommen kann, nicht mit einbezogen werden, werden neben der `EOF`-Kennung auch Zeilen mit unter fünf Zeichen Länge als Dateiende gewertet. Das Zählen der Zeilen ist insbesondere beim Einlesen der Hierarchie- und Koordinatenliste notwendig, da ansonsten zunächst keine Informationen über die Anzahl der Messpunkte beziehungsweise Wachstumseinheiten im Projekt vorliegen.

5. Formatierte Ausgabe der Ergebnislisten

Synopsis:
```
void printoutputlist(FILE *,struct TREEDATA *)
void printtreelist(FILE *,struct TREEDATA *)
void printcrownlist(FILE *,struct TREEDATA *)
void printcoordinatelist(FILE *,struct TREEDATA *)
```

Funktion: Diese vier Routinen dienen der formatierten Ausgabe der Analyseergebnisse im CSV-Format mit Tabulatoren als Trennzeichen. Als Argument wird die jeweilige Ausgabedatei übergeben, wobei es sich auch um die Standardausgabe (Konsolenfenster, `stdout`) handeln kann.

6. Berechnen des Punktabstandes

Synopsis: `float distance(struct COORDINATE *,struct COORDINATE *)`

Funktion: Diese Programmzeilen berechnen den Abstand zwischen zwei beliebigen räumlichen (kartesischen) Koordinaten in Form der direkten Verbindung als Gerade.

7. Feststellen des Sprossfußpunktes

Synopsis: `unsigned int getbasispointnr(struct TREEDATA *)`

Funktion: Der Messpunkt (laufende Nummer in der Koordinatenliste) mit der niedrigsten z-Koordinate wird als Sprossfußpunkt festgelegt.

8. Transformation des Koordinatensystems

Synopsis: `void setrootfrompointnr(struct TREEDATA *,float,float,float)`

Funktion: Diese Routine transformiert sämtliche räumlichen Koordinaten des Messprojektes auf einen neuen Ursprung mit der übergebenen x-,y- und z-Koordinate (in der Regel Sprossfußpunkt). Von den resultierenden Koordinaten werden weiterhin zweidimensionale Polarkoordinaten gebildet. 2D-Koordinatensystem für die Polarkoordinaten ist dabei die x-y-Ebene des 3D-Koordinatensystems.

9. Feststellen des Vorgängersegmentes

Synopsis: `int getparentid(struct TREEDATA *,unsigned int)`

Funktion: Rückgabewert dieser Routine ist die laufende Nummer des „parent"-Segmentes bezüglich des übergebenen „child"-Segmentes. Ist das Segment bereits das unterste Segment, wird eine entsprechende Kennung (`idfirstseg`) übergeben. Für den Fall, dass aufgrund einer Fehlaufnahme kein „parent"-Segment vorhanden ist, wird dies durch den Rückgabewert `iderror` gekennzeichnet.

10. Ermitteln der Segment-ID

Synopsis: `int getsegidfromh(struct TREEDATA *,struct SEGMENT *)`

Funktion: Anhand der Hierarchiedaten aus der übergebenen Segment-Struktur wird das Vorhandensein einer Wachstumseinheit mit diesen Daten überprüft und gegebenenfalls deren laufende Nummer aus der Segmentdatenbank übergeben. Ist das Segment nicht vorhanden, wird dies durch `iderror` gekennzeichnet.

11. Ermitteln des Abstandes zur Sprossbasis

Synopsis:
```
float getbasedistance_p(struct TREEDATA *,unsigned int)
float getbasedistance_m(struct TREEDATA *,unsigned int)
```

Funktion: Diese Routine existiert für photogrammmetrische und manuelle Messwerte in jeweils entsprechender Form und Funktionalität. Sie berechnet für eine bestimmte Wachstumseinheit am Baum die Entfernung zum Sprossfußpunkt, also die Summe der Längen aller „parent"-Segmente. Da dies nicht mehr möglich ist, sobald dieser Messwert für eines der Vorgängersegmente nicht aufgenommen wurde, wird in solchen Fällen `idna` (not available) übergeben.

12. Feststellen der Segmenthierarchie

Synopsis: `int getsegmenthlevel(struct SEGMENT *)`

Funktion: Es wird überprüft, zu welcher Hierarchieebene die jeweilige Wachstumseinheit gehört.

13. Überprüfen auf Nachfolgersegment

Synopsis: `int checkforchild(struct TREEDATA *,unsigned int)`

Funktion: Diese Routine überprüft, ob eine gegebene Wachstumseinheit eines oder mehrere „child“-Segmente hat. In diesem Fall ist der Rückgabewert '1', ansonsten '0'.

14. Gemeinsamen Punkt zweier Segmente finden

Synopsis: `int getcommonpoint(struct SEGMENT *,struct SEGMENT *)`

Funktion: Es wird überprüft, ob zwei benannte Segmente einen gemeinsamen Punkt haben, und wenn ja, welchen. Rückgabewert für „kein gemeinsamer Punkt“ ist `iderror`.

15. Berechnen des Winkels zwischen zwei Segmenten

Synopsis: `float getangle(struct SEGMENT *,struct SEGMENT *,struct TREEDATA *)`

Funktion: Unter der Voraussetzung, dass die beiden als Aufrufparameter angegebenen Segmente einen gemeinsamen Punkt haben, liefert diese Funktion unter Rückgriff auf Vektor-Funktionen den Winkel (im Gradmaß) zurück, der von ihnen eingeschlossen wird. Kann die Berechnung aufgrund nicht erfasster 3D-Punkte nicht durchgeführt werden, wird `idna` zurückgegeben. Haben die beiden Segmente hingegen keinen gemeinsamen Punkt, wird das Programm direkt unter Ausgabe einer entsprechenden Fehlermeldung abgebrochen.

16. Punktkoordinaten anhand der ID abrufen

Synopsis: `struct COORDINATE getcoordinate(int,struct TREEDATA *)`

Funktion: Rückgabewert dieser Funktion ist der Koordinateneintrag eines anhand seiner laufenden Nummer identifizierten 3D-Punktes.

17. Berechnen der Baumhöhe

Synopsis: `float gettreeheight(struct TREEDATA *)`

Funktion: Mit dieser Funktion erhält man die maximale Höhe des Baumes, also die höchste vermessene z-Koordinate unter Ausschluss der Kontrollpunkte.

18. Berechnen der Trieblänge

Synopsis:
```
float getshootlength_p(struct TREEDATA *,int)
float getshootlength_m(struct TREEDATA *,int)
```

Funktion: Diese Funktion ist gleichermaßen für photogrammmetrische wie händische Messwerte implementiert. Sie berechnet, ausgehend von einem Startsegment, die Trieblänge von „unten nach oben“ (siehe dazu die folgende Beschreibung von `getnextsegment()`). Im Falle von nicht

gemessenen Segmentlängen ist die Trieblänge nicht berechenbar, was durch den Rückgabewert `idna` gekennzeichnet wird.

19. Nächstes Segment in selber Hierarchieebene finden

Synopsis: `int getnextsegment(struct TREEDATA *,struct SEGMENT *)`

Funktion: Diese Routine ist eine Hilfsfunktion für die vorangehend beschriebenen Module zur Trieblängenberechnung. Sie übergibt das nächste „child"-Segment in der selben Hierarchieebene beziehungsweise `idna`, falls das Triebende bereits erreicht ist.

20. Feststellen des untersten Pflanzensegments

Synopsis: `int getbasissegid(struct TREEDATA *)`

Funktion: Durch Überprüfen, welches Segment den als Sprossfußpunkt definierten 3D-Punkt beinhaltet, wird mittels dieser Routine die laufende Nummer des untersten Segmentes der Pflanze festgestellt.

21. Berechnen der Äste pro Verzweigungsebene

Synopsis:
```
int getbranchesperlevel_raw(struct TREEDATA *,int)
int getbranchesperlevel(struct TREEDATA *,int)
```

Funktion: Diese beiden Funktionen berechnen die Anzahl von Verzweigungen auf einer bestimmten Hierarchieebene. Im Gegensatz zur ersten Variante schließt die zweite dabei die als Knospen gekennzeichneten Segmente von der Berechnung aus, da diese in der Praxis normalerweise nicht als Verzweigungen betrachtet werden.

22. Berechnen des durchschnittlichen Verzweigungswinkels

Synopsis:
```
float getangleperlevel_raw(struct TREEDATA *,int)
float getangleperlevel(struct TREEDATA *,int)
```

Funktion: Diese beiden Funktionen berechnen den durchschnittlichen Astabgangswinkel der Verzweigungen einer bestimmten Hierarchieebene. Im Gegensatz zur ersten Variante schließt die zweite dabei die als Knospen gekennzeichneten Segmente von der Berechnung aus. Kann der durchschnittliche Winkel nicht errechnet werden, weil Messdaten fehlen, ist der Rückgabewert `idna`.

23. Feststellen der Kronenschirmfläche

Synopsis: `struct CROWN getcrownpoints(struct TREEDATA *)`

Funktion: Diese Routine wählt aus den Koordinaten eines Messprojektes diejenigen Punkte aus, welche als Eckpunkte eines zweidimensionalen Polygons die Kronenschirmfläche definieren. Die Anzahl der Eckpunkte wird durch die Konstante `CROWNPOINTS` festgelegt. Ist in einem Poly-

gonsektor kein Messpunkt vorhanden, wird der Sprossfußpunkt verwendet. Die resultierenden Punkte werden direkt in eine `CROWN`-Struktur eingetragen.

24. Flächenberechnung

Synopsis: `float calculatearea(struct COORDINATE *,unsigned int)`

Funktion: Diese Routine berechnet anhand einer übergebenen Liste mit einer bestimmten Anzahl von 2D-Koordinaten die Fläche des von diesen Punkten umschlossenen Polygons.

25. Umfangberechnung

Synopsis: `float calculateoutline(struct COORDINATE *,unsigned int)`

Funktion: Diese Routine berechnet anhand einer übergebenen Liste mit einer bestimmten Anzahl von 2D-Koordinaten den Umfang des von diesen Punkten umschlossenen Polygons.

Anhang B: Hinweise für den Einsatz des Programmes

Bei dem Auswerteprogramm *PMAnalyse*, wie im Quellcode in Anhang C wiedergegeben, handelt es sich um eine Rohfassung („proof-of-concept“). Es gibt bestimmte Situationen, auf die die Software in der vorliegenden Form nicht vorbereitet ist beziehungsweise unvorhersehbar reagiert. Im Folgenden werden die Problematiken aufgezeigt, welche bei der Anwendung des Programmes in der vorliegenden Form beachtet werden sollten.

1. Das Programm geht davon aus, dass die Eingabedateien weitgehend in korrektem, definiertem Zustand sind. Weitergehende Plausibilitätsprüfungen finden zunächst nicht statt. So wird vorausgesetzt, dass es sich bei den ersten acht (beziehungsweise `numcp`) Punkten der Koordinatenliste auch um die Kontrollpunkte des Projektes handelt. Je nach Durchführung der Messung mit *Photomodeler Pro* kann es aber in seltenen Fällen vorkommen, dass dies nicht der Fall ist, und die Kontrollpunkte nicht die ersten exportierten Koordinatendatensätzen sind. Diese Situation führt folglich zu einer Fehlinterpretation der 3D-Punktdaten durch *PMAnalyse*. Beheben lässt sich diese (selten auftretende) Fehlfunktion zum Beispiel dadurch, dass bereits beim Einlesen der Datei überprüft wird, ob die ersten acht Punkte überhaupt Kontrollpunkte sein können (Koordinaten).

   Weiterhin reagiert das Programm unvorhersehbar auf ungültige Angaben bezüglich Projekt- beziehungsweise Dateinamen, da diese Aufrufparameter direkt weiterverarbeitet werden. Wird als Projektbezeichnung keine Nummer, sondern ein Text angegeben, kann *PMAnalyse* auch keinen aussagekräftigen Wert für die Projektnummer angeben. Es wird ohne weitere Überprüfung der von der Funktion `strtoa()` gelieferte Wert verwendet.

   Fehleingaben bei den Messdaten, gerade in der manuell erzeugten Hierarchiedatei durchaus nicht vollständig auszuschließen, können ebenfalls zu fehlerhaften Analyseergebnissen führen. Allerdings greifen in diesen Fällen meist die Plausibilitätskontrollen in den einzelnen Routinen.

2. Die ausschließliche Verwendung des Punktes '.' als Dezimaltrennzeichen, sowohl bei Ein- als auch Ausgabedateien, schafft Probleme bei korrekt lokalisierten Programmen im deutschsprachigen *Windows*. Die für das jeweils einzusetzende Programm benötigte Form das Dezimaltrennzeichens ist in den CSV-Tabellen somit durch manuelle Bearbeitung (Suchen / Ersetzen-Funktion eines Texteditors) sicherzustellen.

3. *PMAnalyse* hat in bestimmten Messsituationen Probleme bei der Verarbeitung „zwieselartiger" Verzweigungssysteme, das heißt, wenn in der Architektursyntax Subindices verwendet werden müssen. In derartigen Situationen ist unter bestimmten Umständen mit Fehlfunktionen zu rechnen. So ist die Software nicht auf Verzweigungssysteme vorbereitet, in denen gleich vom Sprossfußpunkt aus zwei oder mehrere Segmente abgehen. Ein eindeutig feststellbares Ursprungssegment wird in vielen Routinen vorausgesetzt, die Verwendung von Subindices ist in diesem Fall nicht implementiert. Da derartige Situationen bei Buchen und Fichten allerdings nicht auftreten, ist dies für den gegebenen Anwendungsfall nicht als Nachteil anzusehen. Auch im Falle einer Zwieselbildung des Haupttriebes, also wenn zwei Leittriebe vorhanden sind, können bei *PMAnalyse* in der vorliegenden Form Fehlfunktionen auftreten (konkret ist hier die Funktion `getnextsegment()` zu nennen). Anstatt in derartigen Fällen den 'Y'-förmigen Leittrieb unter der Verwendung von Subindices topologisch aufzunehmen, empfiehlt es sich deswegen, den kürzeren der Zwiesel als Seitentrieb zu kategorisieren, um somit einen eindeutigen Leittrieb zu haben und eventuelle Probleme zu vermeiden.

4. Die Fehlerhandhabung kann noch besser strukturiert werden. Bereits in der vorliegenden Form ist dies grundsätzlich durch eine zentrale Fehlerroutine und verschiedene Fehlerkennwerte gegeben (`iderror` wird für tatsächliche Fehler verwendet, `idna` für Werte, welche aufgrund nicht-kritischer fehlender Parameter nicht berechnet werden können). Diese konsequente Trennung wird allerdings noch nicht bei jeder Routine durchgezogen.

5. Oftmals wurden (bewusst) Rechenschritte, welche eigentlich in einem Schritt, also in einem Schleifendurchlauf, möglich gewesen wären, aus Gründen der klaren Abtrennung einzelner Funktionen auf mehrere Schleifen verteilt. Dies bringt Nachteile im Laufzeitverhalten mit sich. Raum für Optimierungen ist somit durchaus gegeben.

Anhang C: Programmquellcode

Das Kompilieren des Programmquellcodes (`pmanalyse.c`) erfolgt bei Verwendung von *MinGW* beziehungsweise *GCC* mit folgendem Aufruf:

```
gcc -lm -o pmanalyse.exe pmanalyse.c
```

Durch den Parameter `-lm` werden die zusätzlichen mathematischen Bibliotheken mit eingebunden, welche für die trigonometrischen Funktionen erforderlich sind. Der erzeugte Objektdatei trägt den Namen `pmanalyse.exe` (unter *Windows*, unter *Unix* ist das Suffix `*.EXE` nicht nötig).

Auf den folgenden Seiten ist der C-Quellcode des Programmes zum Stand vom Januar 2001 wiedergegeben.

```
/*********************************************************************/
/* Programm zur Auswertung von PhotomodelerPro gelieferten Messdaten */
/* Aufruf: PROGRAMMNAME <Projektnummer> [<Ausgabedateiname>]         */
/* (c) Alexander Riedel 2001                                         */
/* Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung der TU München         */
/*********************************************************************/

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stddef.h>
#include <string.h>
#include <unistd.h>
#include <math.h>
#include <float.h>
#include <ctype.h>
#include <limits.h>

/***********************************/
/* Globale Variablen und Datentypen */
/***********************************/

const int   iderror=-2;        /* Fehlermeldung "ID nicht vorhanden" */
const int   idfirstseg=-1;     /* ID "erstes Segment" */
const float idna=-9999;        /* ID "Wert nicht aufgenommen/unberechenbar" */
const int   maxlinelength=500; /* Maximale Länge Zeile in einer Datei */
const int   maxnamelength=100; /* Maximale Dateinamenlänge */
const int   numcp=8;           /* Anzahl der PMPro-Kontrollpunkte */

#define CROWNPOINTS 8          /* Anzahl der Eckpunkte des Kronenpolygons */
#define MAXHLEVEL 5            /* max. Anzahl Hierarchieebenen */
#define PI (acos(0)*2)         /* Pi */

struct VECTOR                  /* Datentyp für Vektordaten */
{
 float v1,v2,v3;               /* Richtungskomponenten des Vektors */
};

struct COORDINATE              /* Datentyp für einen 3D-Koordinateneintrag */
{
 unsigned int pointid;         /* PMPro-Punkt-ID */
 float x,y,z;                  /* Kartesische Koordinaten */
 float r;                      /* Polarkoordinaten 2D: Abstand von der Basis */
 float angle;                  /* Polarkoordinaten 2D: Winkel */
};

struct SEGMENT                 /* Datentyp für ein Baumsegmentes */
{
 unsigned int treeid;          /* ID des Messbaumes */
 int parentid;                 /* ID des Vorgänger-Segments */
 struct COORDINATE point1;     /* 3D-Punkte, die das Segment definieren */
 struct COORDINATE point2;     /* --"-- */
 unsigned short int hlevel;    /* Hierarchiebene (1-5) */
 unsigned short int h[MAXHLEVEL+1];  /* Hierarchie-Einordnung (1-5) */
 unsigned short int hs[MAXHLEVEL+1]; /* Hierarchie-Einordnung (Subindex) */
 char type_m;                  /* Segmenttyp (manuell)*/
 char type_p;                  /* Segmenttyp (photogrammmetrisch) */
 float length_m;               /* Segmentlänge (manuell)*/
 float length_p;               /* Segmentlänge (photogrammmetrisch) */
 float length_diff_mp;         /* Abweichung Längenmessung _m und _p */
 float length_diff_mpr;        /* Abweichung Längenmessung _m und _p (%) */
 float distancetobasis_m;      /* Segmenthöhe am Baum (manuell) */
 float distancetobasis_p;      /* Segmenthöhe am Baum (photogrammmetrisch) */
 float db_diff_mp;             /* Abweichung Segmenthöhen _m und _p */
 float db_diff_mpr;            /* Abweichung Segmenthöhen _m und _p (%) */
 float diameter_m;             /* Mittendurchmesser (manuell)*/
 float weight_m;               /* Trockengewicht (manuell) */
 float angle_p;                /* Astabgangswinkel (photogrammmmetrisch) */
};

struct CROWN                  /* Datentyp für die Kronenschirmfläche */
{
 float area;                   /* Überschirmte Fläche */
 float circumference;          /* Umfang */
 unsigned int pointlist[CROWNPOINTS+1];   /* lfd. Nr. der Polygonpunkte */
 struct COORDINATE points[CROWNPOINTS+1]; /* Koordinateneintrag */
};

struct TREEDATA                /* Datentyp für die globalen Baumdaten */
{
 unsigned int treeid;          /* ID des Messbaumes */
 struct SEGMENT *listseg;      /* Zeiger auf Segmentliste */
 struct COORDINATE *listc;     /* Zeiger auf Koordinatenliste */
```

```
 struct CROWN *treecrown;      /* Zeiger auf Kronendaten */
 unsigned int numc;            /* Anzahl Koordinaten inkl. Kontrollpunkte */
 unsigned int nump;            /* Anzahl Messdaten (ohne Kontrollpunkte) */
 unsigned int nums;            /* Anzahl Segmente */
 unsigned int basispointnr;    /* Sprossbasispunkt (laufende Nummer) */
 unsigned int basispointid;    /* Sprossbasispunkt (ID) */
 unsigned int basissegid;      /* Basissegment-ID */
 unsigned int segs_level[MAXHLEVEL+1]; /* Segmente pro Hierarchieebene */
 float height_p;               /* Baumhöhe (photogrammetrisch) */
 float length_m;               /* Länge Haupttriebes (manuell) */
 float length_p;               /* Länge Haupttriebes (photogrammmetrisch) */
 unsigned int num_buds_m;      /* Anzahl Knospen (manuell) */
 unsigned int num_buds_p;      /* Anzahl Knospen (photogrammmetrisch) */
 unsigned int branch_raw[MAXHLEVEL+1]; /* Verzweigungen pro Hierarchie-Ebene */
 unsigned int branch_p[MAXHLEVEL+1];     /* Verzweigungen (ohne Knospen) */
 float branch_angle_raw[MAXHLEVEL+1];  /* Abgangswinkel */
 float branch_angle_p[MAXHLEVEL+1];      /* Abgangswinkel (ohne Knospen) */
};

/*****************/
/* Hauptprogramm */
/*****************/

main(int argc,char *argv[])
{

 /* Funktionsdeklarationen, Variablendefinitionen etc. */
 unsigned int getnumlines(FILE *);
 float distance(struct COORDINATE *,struct COORDINATE *);
 int getparentid (struct TREEDATA *,unsigned int);
 void printoutputlist(FILE *,struct TREEDATA *);
 void printcoordinatelist(FILE *,struct TREEDATA *);
 void printtreelist(FILE *, struct TREEDATA *);
 void printcrownlist(FILE *, struct TREEDATA *);
 float getshootlength_p(struct TREEDATA *,int);
 float getshootlength_m(struct TREEDATA *,int);
 void setrootfrompointnr(struct COORDINATE *,unsigned int,float,float,float);
 unsigned int getbasispointnr(struct TREEDATA *);
 unsigned int getbasissegid(struct TREEDATA *);
 float getbasedistance_p(struct TREEDATA *,unsigned int);
 float getbasedistance_m(struct TREEDATA *,unsigned int);
 int getbranchesperlevel(struct TREEDATA *,int);
 int getbranchesperlevel_raw(struct TREEDATA *,int);
 float getangleperlevel(struct TREEDATA *,int);
 float getangleperlevel_raw(struct TREEDATA *,int);
 float gettreeheight(struct TREEDATA *);
 struct CROWN getcrownpoints(struct TREEDATA *);
 int getsegmenthlevel(struct SEGMENT *);
 int checkforchild(struct TREEDATA *,unsigned int);
 int getcommonpoint(struct SEGMENT *,struct SEGMENT *);
 float getangle(struct SEGMENT *,struct SEGMENT *,struct TREEDATA *);
 float calculatearea(struct COORDINATE *,unsigned int);
 float calculateoutline(struct COORDINATE *,unsigned int);
 void errorexit(char *);

 unsigned int i=0,j=0,k=0;       /* diverse Zählervariablen */
 char linebuffer[maxlinelength]; /* Puffer zum Datei-Einlesen */

 FILE *file_h;              /* Datei mit den Hierarchieinformationen*/
 char filename_h[maxnamelength];
 FILE *file_c;              /* Datei mit den Koordinaten */
 char filename_c[maxnamelength];
 FILE *file_output_seg;     /* Ausgabe-Datei Segmentdaten */
 char filename_output_seg[maxnamelength];
 FILE *file_output_tree;    /* Ausgabe-Datei Baumdaten */
 char filename_output_tree[maxnamelength];
 FILE *file_output_crown;   /* Ausgabe-Datei Kronendaten */
 char filename_output_crown[maxnamelength];
 FILE *file_output_coord;   /* Ausgabe-Datei Koordinaten */
 char filename_output_coord[maxnamelength];

 struct COORDINATE *list_c; /* Koordinateneinträge */
 struct SEGMENT *list_seg;  /* Alle Daten zum jeweiligen Segment */
 struct TREEDATA tree;      /* Alle Angaben zum bearbeiteten Baum */
 struct CROWN crown;        /* Alle Angaben zur Krone des Baumes */

 /* Auswerten der Kommandozeilenparameter */

 if((argc<2)||(argc>3))
  errorexit("Falsche Anzahl von Argumenten beim Programmaufruf!");

 /* Öffnen der Eingabedateien */

 strcpy(filename_h,argv[1]); /* Dateinamen aus Baumnummer generieren */
 strcpy(filename_c,argv[1]);
 strcat(filename_h,"h.txt");
```

```
strcat(filename_c,"c.txt");

printf("Lesen von Hierarchiedaten aus Datei %s\n",filename_h);
file_h=fopen(filename_h,"r");
if(file_h==0)
 errorexit("Oeffnen der Hierarchiedaten fehlgeschlagen!");

printf("Lesen von Koordinatendaten aus Datei %s\n",filename_c);
file_c=fopen(filename_c,"r");
if(file_c==0)
 errorexit("Oeffnen der Koordinatendaten fehlgeschlagen!");

/* Öffnen der Ausgabedateien */

if(argc==3) /* 2 Argumente -> Name für Ausgabedatei angegeben */
{
 strcpy(filename_output_seg,argv[2]); /* Dateinamen aus Baum-ID generieren */
 strcpy(filename_output_tree,argv[2]);
 strcpy(filename_output_crown,argv[2]);
 strcpy(filename_output_coord,argv[2]);
 strcat(filename_output_seg,"seg.txt");
 strcat(filename_output_tree,"tree.txt");
 strcat(filename_output_crown,"crown.txt");
 strcat(filename_output_coord,"coord.txt");

 printf("Ausgabe der Segmentdaten nach %s\n",filename_output_seg);
 file_output_seg=fopen(filename_output_seg,"w");
 if(file_output_seg==0)
  errorexit("Anlegen der Ausgabedatei für Segmente fehlgeschlagen!");

 printf("Ausgabe der Baumdaten nach %s\n",filename_output_tree);
 file_output_tree=fopen(filename_output_tree,"w");
 if(file_output_tree==0)
  errorexit("Anlegen der Ausgabedatei für Baumdaten fehlgeschlagen!");

 printf("Ausgabe der Kronendaten nach %s\n",filename_output_crown);
 file_output_crown=fopen(filename_output_crown,"w");
 if(file_output_crown==0)
  errorexit("Anlegen der Ausgabedatei für Kronendaten fehlgeschlagen!");

 printf("Ausgabe der Koordinaten nach %s\n",filename_output_coord);
 file_output_coord=fopen(filename_output_coord,"w");
 if(file_output_coord==0)
  errorexit("Anlegen der Ausgabedatei für Koordinaten fehlgeschlagen!");
}

else /* kein Dateiname angegeben -> Ausgabe in die Standardausgabe */
{
 printf("Ausgabe aller Daten auf die Standardausgabe\n");
 file_output_seg=stdout;
 file_output_tree=stdout;
 file_output_crown=stdout;
 file_output_coord=stdout;
}

/* Initialisierung und Setzen von Default-Werten */

tree.numc=getnumlines(file_c); /* Anzahl der Koordinaten feststellen */
tree.numc--; /* Erste Zeile beim PMPro-Format enthält nur Tabellenkopf */
tree.nums=getnumlines(file_h); /* Anzahl der Segmente feststellen */
tree.nump=tree.numc-numcp; /* Messpunkte=Koordinaten-Kontrollpunkte */
/* Ausreichend Speicherplatz für die diversen Listen bereitstellen */
list_c=malloc(tree.numc*sizeof(struct COORDINATE));
list_seg=malloc(tree.nums*sizeof(struct SEGMENT));
if((list_c==0)||(list_seg==0))
 errorexit("Speicherplatzmangel beim Initialisieren der Arrays!");
tree.listseg=list_seg;
tree.listc=list_c;
tree.treeid=strtoul(argv[1],0,0); /* Baumnummer aus Aufrufparameter bilden */
tree.num_buds_p=0;
tree.num_buds_m=0;
tree.length_p=0;
tree.length_m=0;
tree.height_p=0;
for(i=1;i<=MAXHLEVEL;i++)
 tree.segs_level[i]=0;

/* Koordinatentabelle einlesen und bearbeiten */

/* Erste Zeile überspringen, da Tabellenkopf */
if(fgets(linebuffer,maxlinelength,file_c)==0)
 errorexit("Fehler beim Einlesen der Koordinatendatei!");
 /* Einfacher Test, ob die Datei korrekt ist */
if((strchr(linebuffer,'X')==0)||(strchr(linebuffer,'Y')==0))
 errorexit("Koordinatendatei ist nicht im korrekten PMPro-Format!");
/* Koordinaten ins Array einlesen */
```

```
 for(i=0;i<tree.numc;i++)
 {
  printf("Lese Koordinate Nr. %i\r",i);
  fscanf(file_c,"%u",&list_c[i].pointid);
  fscanf(file_c,"%f %f %f",&list_c[i].x,&list_c[i].y,&list_c[i].z);
 }
 fclose(file_c);
 printf("\n");
 /* Sprossbasispunkt berechnen */
 tree.basispointnr=getbasispointnr(&tree);
 tree.basispointid=list_c[tree.basispointnr].pointid;
 /* Koordinaten transformieren und vektordaten berechnen */
 setrootfrompointnr(list_c,tree.numc,list_c[tree.basispointnr].x,list_c[tree.basispointnr].y,
list_c[tree.basispointnr].z);

 /* Hierarchietabelle einlesen und daraus Strukturtabelle generieren */

 for(i=0;i<tree.nums;i++)
 {
  printf("Lese Segment Nr. %i\r",i);
  fscanf(file_h,"%u",&list_seg[i].treeid);
  for(k=1;k<=MAXHLEVEL;k++)
  {
   fscanf(file_h,"%hi",&list_seg[i].h[k]);
   fscanf(file_h,"%hi",&list_seg[i].hs[k]);
  }
  fscanf(file_h,"%1s",&list_seg[i].type_m);
  fscanf(file_h,"%f %f",&list_seg[i].length_m,&list_seg[i].diameter_m);
  fscanf(file_h,"%f",&list_seg[i].weight_m);
  fscanf(file_h,"%i",&list_seg[i].point1.pointid);
  fscanf(file_h,"%i",&list_seg[i].point2.pointid);
  /* Falls keine manuell gemessenen Werte vorhanden */
  if(list_seg[i].length_m==0)
   list_seg[i].length_m==idna;
  if(list_seg[i].diameter_m==0)
   list_seg[i].diameter_m==idna;
  if(list_seg[i].weight_m==0)
   list_seg[i].weight_m==idna;
  /* Einige Defaultwerte setzen */
  list_seg[i].point1.x=idna;
  list_seg[i].point2.x=idna;
  list_seg[i].point1.y=idna;
  list_seg[i].point2.y=idna;
  list_seg[i].point1.z=idna;
  list_seg[i].point2.z=idna;
  list_seg[i].type_p='z';
  list_seg[i].length_diff_mp=idna;
  list_seg[i].length_diff_mpr=idna;
  list_seg[i].db_diff_mp=idna;
  list_seg[i].db_diff_mpr=idna;
  list_seg[i].angle_p=idna;
 }
 fclose(file_h);
 printf("\n");

 /* Berechnungen anhand der eingelesenen Daten */

 for(i=0;i<tree.nums;i++)
 {
  printf("Bearbeite Segment Nr. %i\r",i);
  /* Händisch erhobener Durchmesser in cm statt mm */
  list_seg[i].diameter_m=list_seg[i].diameter_m/10;
  /* Eintragen der Punktkoordinaten Anfangs-/Endpunkt */
  for(j=0;j<tree.numc;++j)
  {
   if(list_c[j].pointid==list_seg[i].point1.pointid)
   {
    list_seg[i].point1.x=list_c[j].x;
    list_seg[i].point1.y=list_c[j].y;
    list_seg[i].point1.z=list_c[j].z;
   }
   if(list_c[j].pointid==list_seg[i].point2.pointid)
   {
    list_seg[i].point2.x=list_c[j].x;
    list_seg[i].point2.y=list_c[j].y;
    list_seg[i].point2.z=list_c[j].z;
   }
  }
  /* Berechnung Segmentlängen und Abweichung zur manuellen Messung */
  list_seg[i].length_p=distance(&list_seg[i].point1,&list_seg[i].point2);
  if((list_seg[i].length_p!=idna)&&(list_seg[i].length_m!=idna))
  {
   list_seg[i].length_diff_mp=list_seg[i].length_m-list_seg[i].length_p;
   list_seg[i].length_diff_mpr=list_seg[i].length_diff_mp/list_seg[i].length_m*100;
  }
  /* Feststellen des Vorgängersegments */
```

```
  if((list_seg[i].parentid=getparentid(&tree,i))==iderror)
   errorexit("Fehler bei der Berechnung des Vorgaengersegmentes!");
  /* Feststellen der Entfernung vom Sprossbasispunkt und Unterschied zur Handmessung */
  list_seg[i].distancetobasis_p=getbasedistance_p(&tree,i);
  list_seg[i].distancetobasis_m=getbasedistance_m(&tree,i);
  if(list_seg[i].parentid!=idfirstseg)
  {
   if((list_seg[i].distancetobasis_p!=idna)&&(list_seg[i].distancetobasis_m!=idna))
   {
    list_seg[i].db_diff_mp=list_seg[i].distancetobasis_m-list_seg[i].distancetobasis_p;
    list_seg[i].db_diff_mpr=list_seg[i].db_diff_mp/list_seg[i].distancetobasis_m*100;
   }
  }
  /* Hierarchieebene des Segments */
  list_seg[i].hlevel=getsegmenthlevel(&list_seg[i]);
  /* Anzahl der Segmente pro Hierarchieebene */
  tree.segs_level[list_seg[i].hlevel]++;
  /* Winkel zum Vorgängersegment */
  if(list_seg[i].parentid!=idfirstseg)
  {
   if((list_seg[i].point1.pointid!=0)&&(list_seg[i].point2.pointid!=0))
    list_seg[i].angle_p=getangle(&list_seg[i],&list_seg[list_seg[i].parentid],&tree);
  }
  /* Typ des Segments */
  if(checkforchild(&tree,i)==0)
   list_seg[i].type_p='K';
  if(list_seg[i].type_p=='K')
   tree.num_buds_p++;
  if(list_seg[i].type_m=='K')
   tree.num_buds_m++;
 }
 printf("\n");

 /* Generieren noch fehlender Daten über den Baum */
 printf("Erstellen zusammenfassender Daten zum gesamten Baum\n");
 tree.height_p=gettreeheight(&tree);
 tree.basissegid=getbasissegid(&tree);
 tree.length_p=getshootlength_p(&tree,tree.basissegid);
 tree.length_m=getshootlength_m(&tree,tree.basissegid);
 crown=getcrownpoints(&tree);
 tree.treecrown=&crown;
 tree.treecrown->area=calculatearea(tree.treecrown->points,CROWNPOINTS);
 tree.treecrown->circumference=calculateoutline(tree.treecrown->points,CROWNPOINTS);
 for(k=1;k<=MAXHLEVEL;k++)
 {
  tree.branch_p[k]=getbranchesperlevel(&tree,k);
  tree.branch_raw[k]=getbranchesperlevel_raw(&tree,k);
  tree.branch_angle_p[k]=getangleperlevel(&tree,k);
  tree.branch_angle_raw[k]=getangleperlevel_raw(&tree,k);
 }

 /* Ausgabe der eingelesenen Daten */

 printf("\nTransformierte Koordinaten (%u, davon %i CP)\n",tree.numc,numcp);
 if(file_output_coord!=stdout)
  printf("(Ausgabe erfolgt in Datei \"%s\")\n",filename_output_coord);
 printcoordinatelist(file_output_coord,&tree);
 printf("\nKomplette Segmentliste (%u Segmente)\n",tree.nums);
 if(file_output_seg!=stdout)
  printf("(Ausgabe erfolgt in Datei \"%s\")\n",filename_output_seg);
 printoutputlist(file_output_seg,&tree);
 printf("\nBaumdaten\n");
 if(file_output_tree!=stdout)
  printf("(Ausgabe erfolgt in Datei \"%s\")\n",filename_output_tree);
 printtreelist(file_output_tree,&tree);
 printf("\nKronendaten\n");
 if(file_output_crown!=stdout)
  printf("(Ausgabe erfolgt in Datei \"%s\")\n",filename_output_crown);
 printcrownlist(file_output_crown,&tree);
}

/*****************/
/* Fehlerroutine */
/*****************/

void errorexit(char *errortext)
{
 fprintf(stderr,"\n\aFehler: %s\n\n",errortext);
 exit(EXIT_FAILURE);
}

/***********************************/
/* Zählen der Zeilen in einer Datei */
/***********************************/

unsigned int getnumlines(FILE *inputfile)
```

```
{
 unsigned int numlines=0;
 char *inputline[200];

 for(numlines=0;fgets((char *)inputline,200,inputfile);numlines++)
  if(strlen((char*)inputline)<5) break; /* Willkürliche Festlegung */
 rewind(inputfile); /* Wieder zum Dateianfang */
 return(numlines);
}

/************************/
/* Vektormultiplikation */
/************************/

inline float scalarproduct(struct VECTOR vect1,struct VECTOR vect2)
{
 float result;

 result=(vect1.v1*vect2.v1)+(vect1.v2*vect2.v2)+(vect1.v3*vect2.v3);
 return(result);
}

/************************************/
/* Formatierte Ausgabe der Datenliste */
/************************************/

void printoutputlist(FILE *file,struct TREEDATA *data)
{
 int i,k;

 /* Spaltenbeschriftungen */
 fprintf(file,"seg_id pseg_id tree_id type_m type_p hlevel ");
 fprintf(file,"h1 s1 h2 s2 h3 s3 h4 s4 h5 s5 ");
 fprintf(file,"p1_id x1 y1 z1 ");
 fprintf(file,"p2_id x2 y2 z2 ");
 fprintf(file,"dia_m w_m l_m l_p ");
 fprintf(file,"db_m db_p angle_p ");
 fprintf(file,"l_diff db_diff l_pdiff db_pdiff\n");
 /* Daten */
 for(i=0;i<(data->nums);i++)
 {
  fprintf(file,"%-7u %-8i ",i,data->listseg[i].parentid);
  fprintf(file,"%-8u ",data->listseg[i].treeid);
  fprintf(file,"%-7c %-7c ",data->listseg[i].type_m,data->listseg[i].type_p);
  fprintf(file,"%-7i ",data->listseg[i].hlevel);
  for(k=1;k<=MAXHLEVEL;k++)
  {
   fprintf(file,"%-2u ",data->listseg[i].h[k]);
   fprintf(file,"%-2u ",data->listseg[i].hs[k]);
  }
  fprintf(file,"%-6i %-+11.6f %-+11.6f %-+11.6f ",data->listseg[i].point1.pointid,data->listseg[i].
point1.x,data->listseg[i].point1.y,data->listseg[i].point1.z);
  fprintf(file,"%-6i %-+11.6f %-+11.6f %-+11.6f ",data->listseg[i].point2.pointid,data->listseg[i].
point2.x,data->listseg[i].point2.y,data->listseg[i].point2.z);
  fprintf(file,"%-5.2f %-7.4f ",data->listseg[i].diameter_m,data->listseg[i].weight_m);
  fprintf(file,"%-5.1f %-10.5f %-.5f %-11.6f ",data->listseg[i].length_m,data->listseg[i].length_p,
data->listseg[i].distancetobasis_m,data->listseg[i].distancetobasis_p);
  fprintf(file,"%-.4f ",data->listseg[i].angle_p);
  fprintf(file,"%-11.5f %-11.5f ",data->listseg[i].length_diff_mp,data->listseg[i].db_diff_mp);
  fprintf(file,"%-11.5f %-11.5f ",data->listseg[i].length_diff_mpr,data->listseg[i].db_diff_mpr);
  fprintf(file,"\n");
 }
}

/************************************/
/* Formatierte Ausgabe der Baumdaten */
/************************************/

void printtreelist(FILE *file, struct TREEDATA *treedata)
{
 int i;

 /* Spaltenbeschriftungen */
 fprintf(file,"tree_id\tnump\tnums\tbuds_p\tbuds_m\t");
 fprintf(file,"bpoint_id\tbpoint_nr\tbseg_id\t");
 fprintf(file,"height_p\tlength_p\tlength_m\t");
 for(i=1;i<=MAXHLEVEL;i++)
 {
  fprintf(file,"segs_h%i\t",i);
  fprintf(file,"branches_b_h%i\t",i);
  fprintf(file,"angle_b_h%i\t",i);
  fprintf(file,"branches_h%i\t",i);
  fprintf(file,"angle_h%i\t",i);
 }
 fprintf(file,"\n");
 /* Daten */
```

```
 fprintf(file,"%i\t",treedata->treeid);
 fprintf(file,"%i\t%i\t",treedata->nump,treedata->nums);
 fprintf(file,"%i\t%i\t",treedata->num_buds_p,treedata->num_buds_m);
 fprintf(file,"%i\t%i\t%i\t",treedata->basispointid,treedata->basispointnr,treedata->basissegid);
 fprintf(file,"%f\t%f\t%f\t",treedata->height_p,treedata->length_p,treedata->length_m);
 for(i=1;i<=MAXHLEVEL;i++)
 {
  fprintf(file,"%i\t",treedata->segs_level[i]);
  fprintf(file,"%i\t%f\t",treedata->branch_raw[i],treedata->branch_angle_raw[i]);
  fprintf(file,"%i\t%f\t",treedata->branch_p[i],treedata->branch_angle_p[i]);
 }
 fprintf(file,"\n");
}

/*************************************/
/* Formatierte Ausgabe der Kronendaten */
/*************************************/

void printcrownlist(FILE *file, struct TREEDATA *treedata)
{
 int i;
 struct CROWN *crown=treedata->treecrown;

 fprintf(file,"sect\trange\tp_nr\tp_id\tangle\tdist\tx\ty\n");
 for(i=1;i<=CROWNPOINTS;i++)
 {
  fprintf(file,"%i\t",i);
  fprintf(file,"%.1f-",i*360/((float)CROWNPOINTS)-(360/((float)CROWNPOINTS)));
  fprintf(file,"%.1f\t",i*(float)(360/(float)CROWNPOINTS));
  fprintf(file,"%i\t",crown->pointlist[i]);
  fprintf(file,"%i\t",treedata->listc[crown->pointlist[i]].pointid);
  fprintf(file,"%f\t",treedata->listc[crown->pointlist[i]].angle);
  fprintf(file,"%f\t",treedata->listc[crown->pointlist[i]].r);
  fprintf(file,"%f\t",treedata->listc[crown->pointlist[i]].x);
  fprintf(file,"%f\n",treedata->listc[crown->pointlist[i]].y);
 }
 fprintf(file,"area: %f\n",crown->area);
 fprintf(file,"circumference: %f\n",crown->circumference);
}


/*****************************************/
/* Formatierte Ausgabe der Koordinatenliste */
/*****************************************/

void printcoordinatelist(FILE *file,struct TREEDATA *treedata)
{
 int i;

 fprintf(file,"nr\tid\tx\ty\tz\tr\tangle\n");
 for(i=0;i<treedata->numc;i++)
 {
  fprintf(file,"%i %i ",i,treedata->listc[i].pointid);
  fprintf(file,"%f %f %f ",treedata->listc[i].x,treedata->listc[i].y,treedata->listc[i].z);
  fprintf(file,"%f %f\n",treedata->listc[i].r,treedata->listc[i].angle);
 }
}

/*****************************************************/
/* Berechnen des Abstandes zwischen zwei Koordinaten */
/*****************************************************/

inline float distance(struct COORDINATE *c1,struct COORDINATE *c2)
{
 float length;

 if(c1->x==idna||c2->x==idna)
  return(idna); /* wenn einer von den beiden Punkten keine 3D-Koordinaten hat -> N/A */
 length=sqrt((c1->x-c2->x)*(c1->x-c2->x)+(c1->y-c2->y)*(c1->y-c2->y)+(c1->z-c2->z)*(c1->z-c2->z));
 return(length);
}

/***********************************/
/* Feststellen des Sprossfusspunktes */
/***********************************/

unsigned int getbasispointnr(struct TREEDATA *treedata)
{
 unsigned int i;
 unsigned int pointnr=0;

 for(i=numcp;i<treedata->numc;i++)
 {
  if((treedata->listc[i].z)<(treedata->listc[pointnr].z))
   pointnr=i;
 }
```

```
 return(pointnr);
}

/*******************************************************/
/* Transformieren der 3D Koordinaten auf neuen Ursprung */
/* und Berechnung zweidimensionaler Polarkoordinaten    */
/*******************************************************/

void setrootfrompointnr(struct COORDINATE *coordinate,unsigned int num,float xoffset,float yoffset,
float zoffset)
{
 int i;

 for(i=0;i<num;i++)
 {
  if(coordinate[i].pointid!=0) /* Diese Abfrage ist eigentlich redundant, nur vorsichtshalber */
  {
   coordinate[i].x=coordinate[i].x-xoffset;
   coordinate[i].y=coordinate[i].y-yoffset;
   coordinate[i].z=coordinate[i].z-zoffset;
   coordinate[i].r=sqrt(coordinate[i].x*coordinate[i].x+coordinate[i].y*coordinate[i].y);
   if(coordinate[i].x==0&&coordinate[i].y==0)
    coordinate[i].angle=0;
   if(coordinate[i].x==0&&coordinate[i].y>0)
    coordinate[i].angle=PI/2;
   if(coordinate[i].x==0&&coordinate[i].y<0)
    coordinate[i].angle=(3*PI)/2;
   if(coordinate[i].x>0)
    coordinate[i].angle=atan(coordinate[i].y/coordinate[i].x);
   if(coordinate[i].x<0)
   {
    if(coordinate[i].y<0)
     coordinate[i].angle=atan(coordinate[i].y/coordinate[i].x)-PI;
    else
     coordinate[i].angle=atan(coordinate[i].y/coordinate[i].x)+PI;
   }
   /* Winkel im Bogenmass +/-Pi -> Winkel im Gradmass 0-360° */
   coordinate[i].angle=(180/PI)*coordinate[i].angle+180;
  }
 }
}

/*****************************************/
/* Feststellen der ID des Parent-Segmentes */
/*****************************************/

int getparentid(struct TREEDATA *treedata,unsigned int childid)
{
 unsigned int i,parentid;
 char hit=0;
 int getsegidfromh(struct TREEDATA *,struct SEGMENT *);
 struct SEGMENT parent=treedata->listseg[childid];

 for(i=MAXHLEVEL;i>0;i--)
 {
  if(parent.h[i]>0)
  {
   parent.h[i]--;
   hit=1;
   if(parent.h[i]==0)
    parent.hs[i]=0;
  }
  if(hit==1)
   break;
 }
 if(hit!=1)
  parentid=iderror;
 if(parent.h[1]==0)
  parentid=idfirstseg;
 else
  parentid=getsegidfromh(treedata,&parent);
 return(parentid);
}

/*****************************************************/
/* Ermitteln der Segment-ID anhand der Hierarchiedaten */
/*****************************************************/

int getsegidfromh(struct TREEDATA *treedata,struct SEGMENT *find)
{
 unsigned int i,j;
 int segmentid=iderror;
 char hit=0;
 struct SEGMENT *segment=treedata->listseg;

 for(i=0;i<treedata->nums;i++)
```

```
 {
  for(j=1;j<=MAXHLEVEL;j++)
  {
   if((segment[i].h[j]==find->h[j])&&(segment[i].hs[j]==find->hs[j]))
    hit++;
  }
  if(hit==MAXHLEVEL)
   segmentid=i;
  hit=0;
 }
 return(segmentid);
}

/*****************************************************************/
/* Berechnen des Abstandes zur Sprossbasis (photogrammmetrisch) */
/*****************************************************************/

float getbasedistance_p(struct TREEDATA *treedata,unsigned int segid)
{
 int getparentid(struct TREEDATA *,unsigned int);
 float distance=0;
 struct SEGMENT *seglist=treedata->listseg;

 while((segid=getparentid(treedata,segid))!=idfirstseg)
 {
  distance=distance+seglist[segid].length_p;
  if(seglist[segid].length_p==idna)
   return(idna);
 }
 return(distance);
}

/*******************************************************/
/* Berechnen des Abstandes zur Sprossbasis (Handmessung) */
/*******************************************************/

float getbasedistance_m(struct TREEDATA *treedata,unsigned int segid)
{
 int getparentid(struct TREEDATA *,unsigned int);
 float distance=0;
 struct SEGMENT *seglist=treedata->listseg;

 while((segid=getparentid(treedata,segid))!=idfirstseg)
 {
  distance=distance+seglist[segid].length_m;
  if(seglist[segid].length_m==idna)
   return(idna);
 }
 return(distance);
}

/***********************************/
/* Feststellen der Segmenthierarchie */
/***********************************/

int getsegmenthlevel(struct SEGMENT *checksegment)
{
 unsigned int i=1;

 while(checksegment->h[i]!=0)
  i++;
 return(i-1);
}

/***************************************/
/* Feststellen ob Folgesegment vorhanden */
/***************************************/

int checkforchild(struct TREEDATA *treedata,unsigned int checkid)
{
 int getsegmenthlevel(struct SEGMENT *);
 int getsegidfromh(struct TREEDATA *,struct SEGMENT *);
 struct SEGMENT checksegment,check1,check2;
 struct SEGMENT *seglist=treedata->listseg;
 unsigned int num=treedata->nums;
 unsigned int i=0;
 unsigned int hlevel;

 checksegment=seglist[checkid];
 hlevel=getsegmenthlevel(&checksegment);
 check1=checksegment;
 check2=checksegment;
 check1.h[hlevel]++;
 if(getsegidfromh(treedata,&check1)!=iderror)
  i=1;
 else
```

```
  if(hlevel<MAXHLEVEL)
  {
   check2.h[hlevel+1]++;
    if(getsegidfromh(treedata,&check2)!=iderror)
     i=1;
  }
 return(i);
}

/*****************************************/
/* Gemeinsamen Punkt zweier Segmente finden */
/*****************************************/

int getcommonpoint(struct SEGMENT *seg1,struct SEGMENT *seg2)
{
 int commonpointid=iderror;

 if((seg1->point1.pointid==seg2->point1.pointid)||(seg1->point1.pointid==seg2->point2.pointid))
  commonpointid=seg1->point1.pointid;
 if((seg1->point2.pointid==seg2->point1.pointid)||(seg1->point2.pointid==seg2->point2.pointid))
  commonpointid=seg1->point2.pointid;
 return(commonpointid);
}

/*****************************************/
/* Winkel zwischen zwei Segmenten berechnen */
/*****************************************/

float getangle(struct SEGMENT *seg1,struct SEGMENT *seg2,struct TREEDATA *treedata)
{
 int getcommonpoint(struct SEGMENT *,struct SEGMENT *);
 struct COORDINATE getcoordinate(int,struct TREEDATA *);
 void errorexit(char *);
 float scalarproduct(struct VECTOR,struct VECTOR);
 float angle;
 struct COORDINATE origin,vect1,vect2;
 int originid,i;
 struct VECTOR a,b;
 char errorstring[200];

 /* Überprüfen, ob 3D-Koordinaten aller Punkte bekannt sind */
 if(seg1->point1.pointid==0||seg1->point2.pointid==0||seg2->point1.pointid==0||seg2->point2.
pointid==0)
  return(idna);
 /* Gemeinsamen Punkt der Segmente (Scheitel des Winkels) feststellen */
 if((originid=getcommonpoint(seg1,seg2))==iderror)
 {
  sprintf(errorstring,"Modul Winkelberechnung: Kein gemeinsamer Punkt bei den Segmenten mit den
Punkten %i/%i und %i/%i !",seg1->point1.pointid,seg1->point2.pointid,seg2->point1.pointid,seg2-
>point2.pointid);
  errorexit(errorstring);
 }
 else
  origin=getcoordinate(originid,treedata);
 if(origin.pointid!=seg1->point1.pointid)
  vect1=getcoordinate(seg1->point1.pointid,treedata);
 else
  vect1=getcoordinate(seg1->point2.pointid,treedata);
 if(origin.pointid!=seg2->point1.pointid)
  vect2=getcoordinate(seg2->point1.pointid,treedata);
 else
  vect2=getcoordinate(seg2->point2.pointid,treedata);
 a.v1=vect1.x-origin.x;
 a.v2=vect1.y-origin.y;
 a.v3=vect1.z-origin.z;
 b.v1=vect2.x-origin.x;
 b.v2=vect2.y-origin.y;
 b.v3=vect2.z-origin.z;
 /* Winkel berechnen (Bogenmass) und ins Gradmass umrechnen */
 angle=acos(scalarproduct(a,b)/(sqrt(scalarproduct(a,a))*sqrt(scalarproduct(b,b))));
 angle=180/(acos(0)*2)*angle;
 return(angle);
}

/*****************************************/
/* Punktkoordinaten anhand der ID abrufen */
/*****************************************/

struct COORDINATE getcoordinate(int id,struct TREEDATA *treedata)
{
 int i;

 for(i=0;i<treedata->numc;i++)
 {
  if(treedata->listc[i].pointid==id)
   break;
```

```
 }
 return(treedata->listc[i]);
}

/*********************/
/* Baumhöhe berechnen */
/*********************/

float gettreeheight(struct TREEDATA *treedata)
{
 unsigned int i;
 unsigned int pointid=0;

 /* Die ersten 8 Punkte sind Kontrollpunkte */
 for(i=8;i<treedata->numc;i++)
 {
  if((treedata->listc[i].z)>(treedata->listc[pointid].z))
   pointid=i;
 }
 return(treedata->listc[pointid].z);
}


/*****************************************/
/* Trieblänge berechnen (photogrammetrisch) */
/*****************************************/

float getshootlength_p(struct TREEDATA *treedata,int startsegmentid)
{
 int getnextsegment(struct TREEDATA *,struct SEGMENT *);
 struct SEGMENT *seglist=treedata->listseg;
 float length=seglist[startsegmentid].length_p;
 int nextsegmentid=startsegmentid;

 if(startsegmentid==idna)
  return(idna);

 while((nextsegmentid=getnextsegment(treedata,&seglist[nextsegmentid]))!=idna)
 {
  if(seglist[nextsegmentid].length_p!=idna)
   length=length+seglist[nextsegmentid].length_p;
  else
  {
   length=idna;
   break;
  }
 }
 return(length);
}

/*********************************/
/* Trieblänge berechnen (manuell) */
/*********************************/

float getshootlength_m(struct TREEDATA *treedata,int startsegmentid)
{
 int getnextsegment(struct TREEDATA *,struct SEGMENT *);
 struct SEGMENT *seglist=treedata->listseg;
 float length=seglist[startsegmentid].length_m;
 int nextsegmentid=startsegmentid;

 if(startsegmentid==idna)
  return(idna);

 while((nextsegmentid=getnextsegment(treedata,&seglist[nextsegmentid]))!=idna)
 {
  if(seglist[nextsegmentid].length_m!=idna)
   length=length+seglist[nextsegmentid].length_m;
  else
  {
   length=idna;
   break;
  }
 }
 return(length);
}

/*************************************************/
/* Nächstes Segment in selber Hierarchieebene finden */
/*************************************************/

int getnextsegment(struct TREEDATA *treedata,struct SEGMENT *firstsegment)
{
 int i,j;
 int nextsegid=idna;
 int seghlevel=firstsegment->hlevel;
```

```
 struct SEGMENT *seglist=treedata->listseg;

 if(seghlevel==MAXHLEVEL)
  return(nextsegid); /* Der Einfachkeit halber: In der höchsten Hierachiebene können eh keine
Verzweigungen mehr sein */
 for(i=0;i<treedata->nums;i++)
 {
  if(seglist[i].hlevel==seghlevel)
  {
   if(seglist[i].h[seghlevel+1]==0&&seglist[i].h[seghlevel]==((firstsegment->h[seghlevel])+1))
    nextsegid=i;
  }
 }
 return(nextsegid);
}

/*************************************/
/* Feststellen des Sprossbasissegmentes */
/*************************************/

int getbasissegid(struct TREEDATA *treedata)
{
 int i;
 int basissegid=idna;
 struct SEGMENT *seglist=treedata->listseg;

 for(i=0;i<treedata->nums;i++)
 {
  if((seglist[i].point1.pointid==treedata->basispointid)||(seglist[i].point2.pointid==treedata-
>basispointid))
   basissegid=i;
 }
 return(basissegid);
}

/*********************************************************/
/* Berechnung der Äste pro Verzeigungsebene inkl. Knospen */
/*********************************************************/

int getbranchesperlevel_raw(struct TREEDATA *treedata,int level)
{
 int numbranches=0;
 int i=0;
 struct SEGMENT *seglist=treedata->listseg;

 for(i=0;i<treedata->nums;i++)
 {
  if(seglist[i].hlevel==level)
  {
   if((seglist[seglist[i].parentid].hlevel)==(level-1)) /* Niedrigster Level ist 1, Level 0
existiert nicht */
    numbranches++;
  }
 }
 return(numbranches);
}

/*****************************************/
/* Berechnung der Äste pro Verzeigungsebene */
/*****************************************/

int getbranchesperlevel(struct TREEDATA *treedata,int level)
{
 int numbranches=0;
 int i=0;
 struct SEGMENT *seglist=treedata->listseg;

 for(i=0;i<treedata->nums;i++)
 {
  if(seglist[i].hlevel==level)
  {
   if((seglist[seglist[i].parentid].hlevel)==(level-1)&&(seglist[i].type_p!='K'))
    numbranches++;
  }
 }
 return(numbranches);
}

/*********************************************************************/
/* Berechnung des durchschnittlichen Astabgangswinkels inkl. Knospen */
/*********************************************************************/

float getangleperlevel_raw(struct TREEDATA *treedata,int level)
{
 int i=0;
 int flag=0;
```

```
 float angle=0;
 struct SEGMENT *seglist=treedata->listseg;

 for(i=0;i<treedata->nums;i++)
 {
  if(seglist[i].hlevel==level)
  {
   if((seglist[seglist[i].parentid].hlevel)==(level-1)) /* Niedrigster Level ist 1, Level 0
existiert nicht */
   {
    if(seglist[i].angle_p!=idna)
     angle=angle+seglist[i].angle_p;
    else
     flag++;
   }
  }
 }
 if(treedata->branch_raw[level]!=0)
  angle=angle/(treedata->branch_raw[level]-flag);
 else
  angle=idna;
 return(angle);
}

/*******************************************************/
/* Berechnung des durchschnittlichen Astabgangswinkels */
/*******************************************************/

float getangleperlevel(struct TREEDATA *treedata,int level)
{
 int i=0;
 float angle=0;
 int flag=0;
 struct SEGMENT *seglist=treedata->listseg;

 for(i=0;i<treedata->nums;i++)
 {
  if(seglist[i].hlevel==level)
  {
   if((seglist[seglist[i].parentid].hlevel)==(level-1)&&(seglist[i].type_p!='K'))
   {
    if(seglist[i].angle_p!=idna)
     angle=angle+seglist[i].angle_p;
    else
     flag++;
   }
  }
 }

 if(treedata->branch_p[level]!=0)
  angle=angle/(treedata->branch_p[level]-flag);
 else
  angle=idna;
 return(angle);
}

/*********************************/
/* Berechnen der Kronenschirmfläche */
/*********************************/

struct CROWN getcrownpoints(struct TREEDATA *treedata)
{
 struct CROWN crown;
 float secangle=360/((float)CROWNPOINTS);
 struct COORDINATE *point;
 int i,j;
 struct COORDINATE getcoordinate(int,struct TREEDATA *);
 void errorexit(char *);

 /* Im Zweifelsfall ist der Sprossfusspunkt der äusserste Punkt */
 for(i=1;i<=CROWNPOINTS;i++)
 {
  crown.pointlist[i]=treedata->basispointnr;
  crown.points[i]=treedata->listc[treedata->basispointnr];
 }
 /* Feststellen, ob im jeweiligen Segment noch ein weiter aussen liegender Punkt vorhanden ist */
 for(i=numcp;i<treedata->numc;i++)
 {
  point=&treedata->listc[i];
  for(j=1;j<=CROWNPOINTS;j++)
  {
   if((point->angle>=(j-1)*secangle)&&(point->angle<j*secangle))
   {
    if((point->r)>crown.points[j].r)
    {
     crown.pointlist[j]=i;
```

```
     crown.points[j]=*point;
    }
   }
  }
 }
 return(crown);
}

/*********************/
/* Flächenberechnung */
/*********************/

float calculatearea(struct COORDINATE *vertex,unsigned int numvertices)
{
 unsigned int currentpoint;
 unsigned int nextpoint;
 float area=0;
 float currentx,currenty,nextx,nexty;

 for(currentpoint=1;currentpoint<=numvertices;currentpoint++)
 {
  nextpoint=currentpoint+1;
  if(nextpoint>numvertices)
   nextpoint=1;
  currentx=vertex[currentpoint].x;
  currenty=vertex[currentpoint].y;
  nextx=vertex[nextpoint].x;
  nexty=vertex[nextpoint].y;
  /* if(!((currentx==nextx)&&(currenty==nexty))) */
  area+=(0.5*(currentx*nexty-currenty*nextx));
 }
 return(area);
}

/*********************/
/* Umfangberechnung */
/*********************/

float calculateoutline(struct COORDINATE *vertex,unsigned int numvertices)
{
 unsigned int currentpoint;
 unsigned int nextpoint;
 float outline=0;
 float currentx,currenty,nextx,nexty;

 for(currentpoint=1;currentpoint<=numvertices;currentpoint++)
 {
  nextpoint=currentpoint+1;
  if(nextpoint>numvertices)
   nextpoint=1;
  currentx=vertex[currentpoint].x;
  currenty=vertex[currentpoint].y;
  nextx=vertex[nextpoint].x;
  nexty=vertex[nextpoint].y;
  if(!((currentx==nextx)&&(currenty==nexty)))
   outline+=(sqrt((currentx-nextx)*(currentx-nextx)+(currenty-nexty)*(currenty-nexty)));
 }
 return(outline);
}
```

Lebenslauf

Geburtsdatum: 22.12.1972

Geburtsort: Regensburg

Schulausbildung

1978 - 1982	Grundschule Donaustauf
1982 – 1991	Gymnasium Neutraubling

Wehrdienst

1991 - 1992	Wehrdienst Ausbildung zum Reserveoffizier

Studium und Berufsausbildung

Wintersemester 1992 – Sommersemster 1997	Studium der Forstwissenschaften an der Forstlichen Fakultät der Ludwig-Maximilians-Universität München
März / April 1998	Praktikant bei der Firma Prec-Cast, Ungarn, im Bereich „EDV-gestützte Fertigungsplanung und –steuerung“
Juni / Juli 1998	Referendariat bei der Bayerischen Staatsforstverwaltung Rückstellung vom Referendariat wegen der Möglichkeit zur Promotion
August 1998 - Februar 2002	Wissenschaftlicher Angestellter am Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung der Technischen Universität München

Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass ich die Arbeit selbstständig und nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt habe, und dass die Arbeit noch nicht an anderer Stelle zu Prüfungszwecken vorgelegt wurde.

Freising, im Februar 2002

Alexander Riedel