

Endbericht zum Projekt: Entwicklung statistischer und geometrischer Verfahren zur Charakterisierung von Pflanzen- und Bestandesarchitekturen und für Modellvergleiche (KU 847/3-1,2)

26. Mai 2003

1 Allgemeine Angaben

1.1 Antragsteller

Kurth, Winfried, Prof. Dr.
Lehrstuhl Praktische Informatik / Grafische Systeme
Nationalität: Deutsch
BTU Cottbus
Institut für Informatik
Postfach 10 13 44
03013 Cottbus
Tel.: +49 335 693816
E-mail: wk@informatik.tu-cottbus.de
priv.: Herzberger Landstr. 85, 37085 Göttingen

und

Sloboda, Branislav, Prof. Dr. Dr. h.c.
Direktor des Instituts für Forstliche Biometrie und Informatik
Nationalität: Deutsch
Universität Göttingen
Institut für Forstliche Biometrie und Informatik
Büsgenweg 4
37077 Göttingen
Tel.: +49 551 393461
E-mail: fbiom@uni-forst.gwdg.de

1.2 Thema

„Entwicklung statistischer und geometrischer Verfahren zur Charakterisierung von Pflanzen- und Bestandesarchitekturen und für Modellvergleiche“

1.3 Kennwort

Statistik von Pflanzenarchitekturen

1.4 Fachgebiet und Arbeitsrichtung

Forstliche Biometrie und Informatik / Modellbildung und Simulation im Forstbereich, Waldwachstumskunde

1.5 Berichtszeitraum

1.2.2000 – 1.3.2003

1.6 Publikationen

Dzierzon und Kurth (2002), Dzierzon et al. (2003), Oppelt et al. (2000)

2 Arbeits- und Ergebnisbericht

2.1 Ausgangsfragen

Die Pflanzenmodellierung hat in der Vergangenheit eine Vielzahl von Modellen für das Wachstum von Einzelbäumen und Baumbeständen hervorgebracht. Klassische forstliche Ansätze (Prodan (1965), Kramer (1984), Sterba et al. (1995)) beziehen sich auf einzelne Variablen von Individuen bzw. Baumbeständen wie die Höhe oder den BHD bzw. deren Verteilungen in einem Bestand. Diese Ansätze haben neben anderen den Nachteil, Konkurrenz zwischen Individuen zu vernachlässigen und für mehrschichtige Baumbestände, die zusätzlich veränderten Umweltbedingungen ausgesetzt sind, keine plausiblen Werte mehr zu liefern. Weiterentwickelte Modelle (Sloboda und Pfreundt (1989), Pfreundt (1988), Pfreundt und Sloboda (1996), Pretzsch (1992), Pretzsch (2001), Nagel et al. (2000), Guericke (2001)) versuchen über individuenbasierte Ansätze bessere Ergebnisse in Bezug auf Konkurrenzverhalten und Reaktion auf Umweltveränderungen zu erzielen. Das Individuum wird dabei sehr vereinfacht abgebildet, indem die Krone über einfache geometrische Körper wie z.B. achteckige unregelmäßige Pyramiden abgebildet wird. Diese Modelle sind alle in Software-Werkzeuge umgesetzt, die in prozeduralen oder objektorientierten Programmiersprachen implementiert sind. Die Modellparameter sind durchgehend empirisch ermittelt.

Die Modellierungsarbeit besteht aus vier Stufen: Die Analyse der Realität, die Erstellung des Modelles, die Simulation und die Analyse der virtuellen Realität (Validierung). Für die Analyse sowohl von Realität als auch von virtueller Realität existieren einige Werkzeuge, die diese Arbeit unterstützen. Ein sehr starkes Werkzeug ist die Software *AMAPmod* (Godin et al. 1998). Sie stellt ein Tool dar, mit dem es möglich ist, ähnlich einer Abfragesprache, wie sie in Datenbanken üblich ist, Pflanzenarchitekturen zu analysieren. Dieses Tool ist ausgesprochen mächtig. Es hat aber Nachteile: So ist *AMAPmod* nicht vom Anwender erweiterbar, und

man muss die Architektur grundsätzlich in einem *MTG* (Multiscaled Tree Graph) repräsentieren. Eine Integration z.B. eines Voxelspace (Überdeckung mit kubischem Gitter zur räumlichen Diskretisierung) wäre nicht möglich.

Die Analyse erfordert eine intensive statistische Aufbereitung von Baum- bzw. Bestandesarchitektur. Architektur meint hier nach Godin (2000) Dekompositions-, Geometrie- und Topologieinformation. *AMAPmod* wäre in diesem Bereich sicherlich ein ausgesprochen starkes Werkzeug, es wäre aber auch sinnvoll, eine allgemeine Möglichkeit zu haben, Statistik zu betreiben. Selber ein Statistikwerkzeug zu programmieren ist sicherlich ineffizient. Daher ist es sinnvoll, statistische Software in ein allgemeines Analysetool zu integrieren, ohne dass monetäre Kosten anfallen.

Konzeptionell könnte eine klarere Trennung von topologisch-geometrischer Pflanzenbeschreibung und nichtgeometrischen Attributen (betreffend etwa Biomassen, photosynthetische Kapazitäten und andere physiologische Eigenschaften, sowie Bewertungsgrößen wie die Holzqualität) sowohl im Formalismus als auch in der technischen Implementation für manche Zwecke sinnvoll sein. Es entstünde eine größere Flexibilität in der Anzahl der Attribute, und es wäre möglich, die Attribute in einer separaten Datei oder Datenbank abzulegen, ohne dass sie stets zusammen mit dem geometrischen Objekt im Arbeitsspeicher präsent sein müssten. Dieses würde die Kapazitätsanforderungen an den Arbeitsspeicher verringern, was besonders für die Modellierung größerer Bestände ein zentrales technisches Erfordernis darstellt. – Für ein integriertes Datenspeichermodell wäre es darüberhinaus sinnvoll, die Architekturdaten ebenfalls unter einem geeigneten Dateiformat für Datenbanken verfügbar zu halten.

Grundlage dieses Projektes ist die Modellierung von Pflanzenwachstum auf der Basis von Individuen. Dazu existieren viele Ansätze (vgl. Pretzsch (2001) oder Nagel et al. (2000)). In den bisherigen Untersuchungen aus dem Bereich der forstlichen Waldwachstumsmodellierung werden Bäume im Verjüngungsalter aber meist vernachlässigt. Es existieren empirisch begründete Methoden zur Vereinfachung der Berechnung des Lichteinfalles über den sog. *C66*-Index nach Nagel und Wagner (1998), der einen überschirmenden Bestand berücksichtigt. Stärker physiologisch orientierte Modelle (etwa List et al. (1994), Eschenbach (2000), Perttunen et al. (1998)) beziehen zwar beliebige Altersstufen und Lichtregimes ein und greifen in stärkerem Maße auf Kausalzusammenhänge zurück, sind aber für praktische Anwendungen in der Forstwirtschaft schwierig zu parametrisieren, und ihre Anwendung auf größere Bestände verbietet sich derzeit aufgrund des zu hohen Rechenaufwandes. Regelbasierte Modellvereinfachungen, wie sie im Rahmen des ersten Teils dieses Projektes (siehe Zwischenbericht) entwickelt wurden, bilden einen vielversprechenden Kompromiss: Sie erlauben eine Kalibrierung an kleinen Pflanzen-Ensembles unter Heranziehung der Simulationsergebnisse kausal fundierter Modelle wie *LIGNUM*, zugleich aber – dank der Verwendung weniger komplexer Abfragen und Simulationsalgorithmen – den Einsatz für Bestände in forstlich relevanten Dimensionen. Interessant wird dieses besonders in heterogenen Beständen mit Naturverjüngung. In der ersten Projektphase wurde die Verjüngung noch nicht berücksichtigt. Seitens des Waldbaus besteht an Modellen zur Konkurrenz- und Wuchsdynamik in der Verjüngungsphase großes Interesse (B. von Lüpke, mdl. Mitteilg.).

In der ersten Projektphase wurde aufgrund der Datenlage die Kiefer als Modellbaum gewählt. Über das Wachstum und über das Konkurrenzverhalten von Kiefernverjüngung weiß man relativ wenig. Es existieren zwar laufende Projekte an der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt (S. Rumpf, mündl. Mitteilg.), diese beschäftigen sich aber mit der Modellierung von Fichtennaturverjüngung und nicht mit Kiefer. Aus diesem Projekt ist zusätzlich bekannt, dass die Aufnahme von Wachstums- und Konkurrenzparametern im Feld ausgesprochen schwierig ist. Ein neuer Ansatz, der sich in natürlicher Weise aus unseren bisherigen Vorar-

beiten ergibt, wäre, das Verjüngen eines Kiefernbestandes mit Hilfe der Aggregation des Kiefernmodelles von *LIGNUM* (Perttunen et al. 1998) zu gestalten. *LIGNUM* simuliert nur einen einzelnen Baum. Es ist aber möglich, die Lichtreduktion durch einen das Individuum umgebenden Bestand über die Bestandesdichte zu schätzen. In Dzierzon et al. (2003) ist dieses Modell bereits benutzt. Es hat den Nachteil, nur den Lichteinfall von der Seite zu berücksichtigen. Eine Reduktion des Lichteinfalles von oben wie etwa bei Pfreundt und Sloboda (1996), wie ihn ein überschilderter Bestand bewirkt, existierte bis jetzt nicht. Man musste diesen Ansatz daher um eine Komponente erweitern, die einen Bestand abbildet, der „über“ dem Individuum wächst. Eine Vereinfachung dieses Modelles sollte in der Lage sein, einen Jungbaum unter Schirm in realistischer Weise zu simulieren. Dabei wäre es sinnvoll, sensitive Lindenmayer-Systeme zu benutzen (Kurth und Anzola Jürgenson (1997), Kurth (1999), Kurth und Sloboda (1999a,b)).

Alle individuenbasierten Bestandesmodelle wie die von Pretzsch (2001), Nagel et al. (2000) sind mit prozeduralen bzw. objektorientierten Sprachen umgesetzt. Diese Sprachen haben den großen Nachteil, intransparent und umständlich zu sein. Jede Veränderung des Modelles zieht die Neuübersetzung des Programmes nach sich. Außerdem ist es für einen externen Wissenschaftler schwierig, das Modell und damit die Simulationsergebnisse nachzuvollziehen. Ein Lösungsansatz sind regelbasierte Sprachen wie Lindenmayersysteme (L-Systeme) (Prusinkiewicz und Lindenmayer 1990, Prusinkiewicz et al. 1999, 2000, Kurth 1999, Kurth und Sloboda 1999a,b). L-Systeme haben eine stark komprimierte Syntax und erlauben, sich bei der Umsetzung des Modelles auf die wesentlichen Punkte zu konzentrieren. Die Programmierung von prozeduralem oder objektorientiertem Code ist nicht erforderlich. Eine Umsetzung auch derartiger einfacher Modelle mit L-Systemen erscheint daher erstrebenswert.

2.2 Zielsetzungen

Die Zielsetzung hat sich im Laufe der Projektarbeit verändert. Ursprünglich hatte das Projekt eine betont statistische Ausrichtung. Es sollte ein Werkzeugkasten von Verfahren zur Beschreibung und zum Vergleich von Einzelbaum- und Bestandesstrukturen entwickelt werden. Dies sollte die Validierung von Modellen, aber auch die Vergleichsmöglichkeit zwischen verschiedenen Modellen unterstützen. Dazu sollte zusätzlich eine mathematische Analyse der Zusammenhänge zwischen verschiedenen Beschreibungsverfahren durchgeführt werden. Als ein Beispiel sollte die Modellreduktion von detaillierten Struktur-Funktions-Modellen dienen. Ein Ergebnis sollten ferner Simulationen sein, die das Verhalten von Strukturmerkmalen bei unterschiedlichen waldbaulichen Maßnahmen untersuchen. Der weitgespannte Arbeitsplan — von neuen mathematischen Modellen bis hin zu kompletten anwendungsbezogenen forstlichen Simulationen auf mehreren Komplexitätsebenen — erforderte im Laufe des Projektes mit den hier gegebenen Ressourcen, sich stärker auf Schwerpunkte zu fokussieren. Ausschlaggebend bei der Wahl der Schwerpunkte waren, neben eigenen Forschungsinteressen, auch die Interessen unserer finnischen Kooperationspartner und der (von ihnen geteilte) Wunsch, rasch zu publikationsfähigen Resultaten zu gelangen. Im Kontext der bereits begonnenen Arbeiten an *LIGNUM* und *GroDisc* schien es sinnvoll, die Entwicklung weiterer, neuer statistischer Parameter zurückzustellen zugunsten einer besseren Nutzbarkeit von theoretisch schon vorhandenen Werkzeugen und einer Analyse des Einsatzes von Modellen und Techniken, die auf abstraktem Niveau schon öfter diskutiert wurden (z.B. Fraktalität; beschattende Biomasse; pipe model), an realen forstlichen Objekten. Der Fortsetzungsantrag beinhaltet dementsprechend bereits diese Umorientierung hin zu eher modellierungs- und informationstechnischen Zielen und Anwendungen. So sollte das bis dahin erstellte Werkzeug *GroDisc* zwecks Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten mit einer Datenbankkomponente ergänzt werden. Ebenso sollte es

dem Benutzer der Software ermöglicht werden, über eine einfache Beschreibungssprache für Bestandesarchitekturen interaktiv Objekte zu erzeugen bzw. Eigenschaften von Strukturen abzufragen. Ein zusätzliches Ziel war die Erstellung eines exemplarischen Verjüngungsmodells für die Baumart Kiefer. Dieses Modell sollte auf einer Vereinfachung des komplexen Struktur-Funktions-Modells *LIGNUM* beruhen. Die Ergebnisse galt es mit dem Werkzeug *GroDisc* zu untersuchen und anschließend zu bewerten.

2.3 Darstellung der durchgeführten Arbeiten

Im folgenden sollen die Arbeiten dargestellt werden, die im Projekt vorgenommen wurden. Die Projektarbeit konzentrierte sich auf drei Teilbereiche: Die Erstellung eines Analyse- und Diskretisierungstools, die Analyse eines Realbestandes und dessen Vermessung und die Aggregation eines vorhandenen detaillierten Einzelbaummodelles zu einem regelorientierten Modell am Beispiel von *LIGNUM*. Die Baumart bei der Modellbildung bzw. Bestandesrekonstruktion ist die gemeine Kiefer (*Pinus sylvestris* L.).

2.3.1 *GroDisc*

Als eine wichtige Zielsetzung war die Erstellung einer Software vorgesehen, die die Analyse- und Diskretisierungsarbeit in möglichst allgemeiner Weise übernimmt. Datenschnittstellen sollten den Datenaustausch zu unterschiedlichsten Fremdwerkzeugen wie *LIGNUM* (Perttunen et al. 1998) und *AMAPmod* (Godin et al. 1998) sicherstellen. Im Folgeantrag ist dann zusätzlich noch ein Parser und eine Schnittstelle zu einer Datenbank vorgesehen. Ferner bot sich an, für statistische Analysen das Interfacekonzept um eine Schnittstelle zu einer statistischen Analysesoftware zu erweitern. Bei der Integration von externer Software wurde darauf geachtet, solche Software zu verwenden, die der sog. *GPL* Lizenzierung unterliegt, also für den nicht kommerziellen Gebrauch kostenlos ist.

Wichtige Zielsetzung für die Erstellung eines Analysewerkzeuges waren zwei Punkte: maximale Generalität und Transparenz. Die Datenstruktur sollte aber auch Bestandesarchitektur komplett abbilden. Das heißt, dass Geometrie, Topologie und Dekompositionsinformation abgebildet werden müssen (vgl. zum Begriff Architektur Godin (2000)). Dies sind besonders starke Anforderungen an die interne Datenstruktur einer Software. *GroDisc* ist in *C++* umgesetzt, daher war eine Klassenhierarchie umzusetzen, die architektonische Daten in sehr allgemeiner Weise abbilden kann. Diese Klassenhierarchie bildet einfache geometrische Körper ab und fasst sie wie bei geografischen Informationssystemen in geometrisch einheitlichen Kollektiven zusammen (Layers). In der Sprache der *GIS*-Welt (s. Pfund (2002)) handelt es sich dabei um eine Repräsentation auf der Grundlage geometrischer Primitive („constructive solid geometry“), wobei mengentheoretisch nur Vereinigungsmengen umgesetzt sind. Technisch ist diese Klassenhierarchie eine Listenstruktur, die die verschiedenen Ebenen der Betrachtung miteinander verbindet. Die Primitive werden hier gemäß der Sprachregelung, die im Bereich von ökologischen Modellen verwendet wird, als elementare Einheiten (EU, „elementary Units“) bezeichnet. Diese werden dann in Layers zusammengefasst.

Eine weitere wichtige Zielsetzung war die Abkopplung der Attributinformation vom geometrischen Element. Hintergrund ist, dass die Abspeicherung von Attributinformation als Mitglied einer Klasse oder Struktur sehr statisch ist. Es gibt aber eine Vielzahl von potenziellen Attributen. Um zumindest innerhalb der Datenstruktur diese dynamische Attributinformation zu gewährleisten, wird diese Information als Liste in einem layer compartment gehalten, die frei erweiterbar bzw. reduzierbar ist. Die Umsetzung als *STL*-„map“ ermöglicht die Umsetzung

ähnlich eines Datenbankfeldes. Über den Namen und den Typ eines Attributs ist die Information über einen Klammeroperator verfügbar zu machen.

Topologie ist ebenfalls in der Struktur abbildbar. Sie wird nicht implizit über die Klassenhierarchie abgebildet, wie das etwa in *LIGNUM* (Perttunen et al. 1998) der Fall ist, sondern die Nachbarschaftsbeziehungen werden explizit in Listen abgespeichert.

Diese Listenstruktur basiert auf dem Konzept der C++ Standard Template Library (*STL*). Dieses Konzept beinhaltet ebenfalls die Umsetzung von Algorithmen. In diesem Konzept wird die Anweisung eines Algorithmus, die an einem Listenelement ausgeführt werden soll, von dem Traversierungsverfahren getrennt. Technisch bedeutet das, dass der Algorithmus eine Funktion ist, die das „Durchfahren“ durch die Struktur übernimmt. Diese Funktion bekommt die Anweisung in Form eines Operators übergeben. Dieser Operator kann eine Funktion oder ein sogenannter Funktor sein. Ein Funktor ist ein Klammeroperator innerhalb einer Struktur oder alternativ einer Klasse (cf. Stroustrup (1998), Breyman (1998)). Dieses Konzept ist ebenfalls für die *GroDisc*-Listenstruktur umgesetzt. Die algorithmischen Funktionen sind etwas komplizierter, da parallele Listen existieren, die man nicht so einfach sequentiell behandeln kann. Prinzipiell ist die Funktion der Algorithmen aber identisch. Folgende Funktionen wurden realisiert: *ForEach*, *Accumulate*, *ForEachPair*, *AccumulatePairs*, *FindIf*, *FoundIf*.

Die Funktionen *ForEachPair* und *AccumulatePairs* basieren – wie der Name schon sagt – auf der *ForEach*- und *Accumulate*-Konzeption, haben aber eine etwas andere Funktion. In manchen Situationen ist es sinnvoll, nicht die Elemente einzeln zu betrachten, sondern einen Paarvergleich durchzuführen. Das ist etwa wichtig bei der Berechnung des kleinsten Abstandes, der in einem Baumbestand existiert. Diese genannten Funktionen übergeben dann auch dem Operator alle existierenden Paare. Die Art und Weise, wie diese Funktionen intern aufgebaut sind und wie sie die Listen traversieren, erlaubt es, entweder zwei verschiedene Listen zu übergeben oder aber auch ein und dieselbe zweimal. Bei dem Abstandsbeispiel z.B. betrachtet man nur ein und denselben Bestand. Es wäre aber auch denkbar, die Abstände zwischen einem Punktraster und den Baumbasispunkten betrachten zu wollen. Dann würde man zwei verschiedene Listen übergeben. Beides ist möglich. Es ist auch möglich, Werte für die Elemente der Referenzliste zwischenzuspeichern. Das ist etwa sinnvoll, wenn beispielsweise der kleinste Abstand für jeden Baum oder Punkt berechnet werden soll.

In der Welt der statistischen Datenanalyse, aber auch im Bereich Analyse von Baumarchitekturen sind bereits eine Vielzahl von Tools vorhanden. Für die Umsetzung von *GroDisc* bedurfte es externer Werkzeuge aus drei Bereichen: Statistische Datenanalyse, Datenbank und Baumarchitektur. Glücklicherweise existieren in allen drei Bereichen frei verfügbare Softwaresysteme. Für die Datenanalyse wurde die Software *R* verwendet. Die Datenbankschnittstelle wurde mithilfe von *Qt*-Schnittstellen-Klassen zu *MySQL* erstellt. Das Baumarchitekturwerkzeug *AMAPmod* unterliegt nicht der GPL, ist aber Freeware. Zu allen Werkzeugen sind Datenschnittstellen erstellt worden. Sie sind zusätzlich von einer graphischen Benutzeroberfläche ansprechbar.

Eine weitere Anforderung an *GroDisc* war das Erstellen einer Datenschnittstelle zu *LIGNUM*. Der Datentransfer kann über eine Datenschnittstelle erfolgen, wobei ein *LIGNUM*-Baum in das von *GROGRA* und von *GroDisc* lesbare *DTG*-Format überführt wird. *GroDisc* selbst kann aber auch intern *LIGNUM*-Bäume sowohl in die *GroDisc*-Struktur übersetzen als auch selbst erzeugen. Die Schnittstelle ist also bidirektional implementiert (vgl. auch Dzierzon et al. (2003)).

2.3.2 Erweiterungen der *GROGRA-L-System-Spezifikation*

Für die vereinfachte Modellierung der Kronenarchitektur von Baumindividuen war es notwendig, die *GROGRA-L-System-Spezifikation* in einigen Punkten zu erweitern. Die Baumkrone sollte über eine unregelmäßige Pyramide dargestellt werden. Die Basis dieser Pyramide sollte die Kronenausdehnung analog zu den Kronenablotungsmessungen im Realbestand repräsentieren. Die Oberfläche einer Pyramide besteht aus Dreiecken. Der Spezifikation ist daher ein Turtle-Kommando hinzugefügt worden, das die Turtle anweist, ein Dreieck ($T(e_1, e_2, e_3)$) mit den Ecken e_1, e_2, e_3 zu erzeugen. Die Ecken müssen vorher durch das Kommando $S(e_n)$ spezifiziert werden.

Für die Rekonstruktion des Realbestandes sollte eine Abstandssensitivität genauso oder ähnlich wie im Ansatz von Pretzsch (1992) zu Grunde liegen. Dieses erforderte eine sensitive Funktion, die den Abstand der Krone zur Kronenoberfläche des nächsten Nachbarn berechnet. Um diesen Abstand berechnen zu können, muss die Pyramidenbasis durch ein Segment repräsentiert werden. Die Funktion berechnet den Abstand zwischen dem Endpunkt einer solchen Basiseinheit unter Berücksichtigung ihrer Richtung und der Oberfläche des nächsten Dreiecks. Der Abstand darf negativ sein, was eine Überlappung bedeutet. Die Überlappung darf aber nicht kleiner sein als der Abstand vom Endpunkt der Basiseinheit zum Stamm des dazugehörigen Baumes.

Die Verjüngungsmodellierung erforderte eine Berücksichtigung des Lichtgenusses eines Baumes. Es existierte dazu in *GROGRA* schon die sensitive Funktion 15. Diese Funktion berechnet, wie stark eine Einheit durch andere Einheiten von einem virtuellen Himmel abgeschirmt ist. Das Lichtmodell basiert hier auf den Überlegungen von den Dulk (1989). Es wird getestet, ob ein Lichtstrahl aus einem bestimmten Himmelssektor von einer Einheit abgeschirmt wird. Die Funktion gibt den Anteil zurück, der nicht „beschattet“ ist. Zusätzlich ist noch die Funktion 18 hinzugefügt worden, die prinzipiell die gleiche Funktionalität aufweist, den Anteil aber nach dem Sinus der Richtung des Sektors gewichtet. Diese Vorgehensweise ist etwas realistischer, da die Menge an Licht bei bedecktem Himmel nicht gleichverteilt über die Sektoren ist, sondern aus dem Zenith in der Regel wesentlich mehr Licht kommt als von den seitlichen Richtungen.

2.3.3 Rekonstruktion eines Bestandes

Im Laufe des Projektes wurde zu Demonstrationszwecken ein Kiefernbestand vermessen. Auf dieser Datengrundlage wurde eine Bestandesrekonstruktion erstellt, die aufzeigen sollte, dass Modelle wie die von Pretzsch (1992, 2001) mit Hilfe von Lindenmayer-Systemen umsetzbar sind. In der Arbeit von Duchiron (2000) ist im Jahre 1995 ein Kiefernbestand vermessen worden. Dieser liegt in Norddeutschland bei Syke/Bremen. Der Bearbeiter des Projektes hat diesen Bestand im Jahre 2001 erneut vermessen, um Information über das Wachstumsverhalten zu erlangen.

Diese Rekonstruktion ist dann mit Hilfe eines L-Systems umgesetzt worden. Dabei sind die im Projekt erstellten Erweiterungen zum Einsatz gekommen. Die Kronenoberflächen wurden durch Dreiecke repräsentiert, und für die Abstandskalkulation ist eine sensitive Funktion benutzt worden.

2.3.4 Erweiterungen in *LIGNUM*

Für die beispielhaften Modellreduktionen ist das Modell *LIGNUM* (Perttunen et al. 1996, 1998) zur Anwendung gekommen. *LIGNUM* ist nicht nur ein physiologisch orientiertes Wachstums-

und Strukturmodell für verschiedene Baumarten, es ist auch ein Programmierwerkzeug für die Umsetzung von Modellen. Technisch ist es eine Bibliothek, mit verschiedenen generellen Möglichkeiten, um ein Modell umzusetzen (vgl. dazu auch Dzierzon und Kurth (2002)). Das Modell besteht aus zwei Komponenten: Die Umsetzung des eigentlichen Baumes und ein Lichtmodell.

Das Modell sollte eigentlich für einen kompletten Baumbestand angewendet werden. Da das mit der vorhandenen Version von *LIGNUM* nicht möglich war, musste *LIGNUM* um einige Komponenten erweitert werden. Es existierte bereits eine sogenannte „Forest“ Version, die es ermöglichte, einen den Einzelbaum umgebenden Bestand vereinfacht abzubilden. Dies ist ungefähr so vorstellbar, dass der Baum in einem „Loch“ aufwächst. Der umgebende Bestand wird hier als reiner homogener Lichtreduktionsfaktor angesehen. Die Lichtreduktion ist abhängig von der Distanz, die ein Lichtstrahl im virtuellen Bestand zurücklegt, und dem Extinktionskoeffizienten.

Der Bearbeiter hat dieses Modell um zwei Komponenten erweitert. Die eine lässt einen inhomogenen Bestand um den Baum herum zu. Es ist möglich, die Umgebung des Baumes in frei wählbar viele Sektoren zu unterteilen, denen man verschiedene Bestandesdichten zuweisen kann. Es wird berechnet, welche Sektoren ein Lichtstrahl durch- und welche Reduktion erfährt.

Dieselbe theoretische Grundlage hat eine zweite Erweiterung. Die Idee war, das Verhalten eines Baumes unter einem virtuellen Schirm zu untersuchen. Da die Kiefer eine Lichtbaumart ist, war zu erwarten, dass auch die virtuelle Kiefer unter einem geschlossenen Dach nicht wachsen würde. Es ist daher ein „Loch“ in das Kronendach modelliert worden. Es galt zu untersuchen, wie die Größe des Loches bzw. die Position des Baumes zum Rand des Loches hin auf das virtuelle Wachstum des Baumes wirkt.

2.3.5 Sensitivitäts- und Plausibilitätstest mit *LIGNUM*

Bevor die eigentlichen Simulationen mit *LIGNUM* durchgeführt wurden, sind an *LIGNUM* speziell mit den Erweiterungen Sensitivitäts- und Plausibilitätstests durchgeführt worden. Dabei galt es zu untersuchen, wie sich *LIGNUM* über einen längeren Zeitraum verhält und wie sich dabei verschiedene Lichtregimes auf das Wachstum auswirken. Untersucht wurden dabei Parameter, die auch schon bei der Vermessung des Realbestandes zu Grunde gelegt wurden: also BHD, Höhe, Kronenbasis und Kronenausdehnung. Die Arbeit der Diskretisierung wurde von *GroDisc* übernommen. Für die Ergebnisse wurden *LIGNUM*-Kiefern über 50 Jahre simuliert und unterschiedlichen Bestandesdichten ausgesetzt. Die Ergebnisse wurden qualitativ untersucht. Um einen Überblick zu bekommen, ob die Parameter von der Größenordnung her richtig und plausibel sind, sind die Ergebnisse des Endstadiums mit den Realdaten aus Syke verglichen worden.

Ergänzend und im Hinblick auf die angestrebte Verjüngungssimulation sind Vergleiche zwischen einer elfjährigen virtuellen Kiefer mit Realkiefern gleichen oder ähnlichen Alters angestellt worden. Der Vergleich erfolgte anhand des Wasserflussverhaltens, der fraktalen Geometrie, dem Ansatz von Chiba (2000) und einer statischen Durchmesseranalyse nach McMahon und Kronauer (1976). Dieses ist veröffentlicht in Dzierzon et al. (2003).

Während eines zweiten Aufenthaltes an der METLA sind zusätzlich für die Überprüfung der Plausibilität der Simulationsergebnisse derjenigen Kiefern, die unter einem virtuellen Schirm wachsen, Simulationsläufe durchgeführt worden.

2.3.6 Verjüngungsmodell

In der Zielsetzung waren Beispiele für die Aggregation eines Struktur-Funktions-Modelles vorgesehen. In der Welt der Bestandesmodellierung existieren nur wenige Modelle zur Verjüngung, da die Datenerhebung schwierig und aufwändig ist. Die Modellreduktion einer *LIGNUM*-Kiefer sollte beispielhaft zeigen, dass es möglich ist, komplizierte Modelle zu aggregieren. Dazu wurde als Grundlage für ein Verjüngungsmodell eine *LIGNUM*-Kiefer unter einem Kronendach simuliert. Das Lichtregime des beschirmenden Bestandes ist gekennzeichnet durch eine Lücke, die unterschiedliche Größen annehmen kann. Es wurde untersucht, inwieweit die Größe der Lücke und die Position des Baumes zum Rand der Lücke Einfluss auf das Wachstum der *LIGNUM*-Kiefer hat. Die Erweiterungen an *LIGNUM* und die *GROGRA*-L-System-Erweiterungen, die dafür notwendig waren, sind bereits beschrieben. Es sind dann verschiedene Simulationsläufe durchgeführt worden. Diese hatten zum Ziel, herauszufinden, wie der Einfluss der Größe des Loches und der Abstand zum Rand des Loches auf das Wachstum zu veranschlagen ist, und ob hier beide Modelle — das komplexe und das vereinfachte — übereinstimmende Ergebnisse liefern.

Anschließend sind die *LIGNUM*-Ergebnisse analysiert worden. Die Analysen sind in durchschnittliche Wachstumsraten der Parameter Durchmesser, Höhe, Position der Kronenbasis und Kronenausdehnung eingeflossen. Diese Ergebnisse sind dann in einem L-System umgesetzt worden. Im L-System sollten die Funktion 15 bzw. 18 zum Einsatz kommen. Es war daher notwendig, das Wachstum in Abhängigkeit vom realen Lichtgenuss zu analysieren. Zu diesem Zweck ist bei der Simulation der *LIGNUM*-Kiefern der Lichtgenuss gemäß der Funktion 18 berechnet worden. Diese Analyse ist dann in ein L-System eingeflossen, das die Wachstumsrate in Abhängigkeit vom Lichtgenuss abgebildet hat. Im L-System war dann noch das Problem zu lösen, das Kronendach und das Loch nachzubilden, da es in der *GROGRA*-Spezifikation keinen geeigneten geometrischen Körper wie einen Hohlzylinder gibt. Das Kronendach wurde daher mittels virtueller Palisaden simuliert, die in einer optimalen raumfüllenden Spiral-Anordnung (analog zu Spiralen aus der Phyllotaxis) um den Baum herum stehen. Das Loch wird dadurch nachgebildet, dass innerhalb eines bestimmten Radius keine Palisaden vorhanden sind.

2.3.7 Abweichungen vom Konzept und Probleme

Die Softwareentwicklung hat sich als umfangreicheres Problem dargestellt als zunächst angenommen. Im Fortsetzungsantrag ist beispielsweise die Erstellung eines kleinen Parsers vorgesehen gewesen. Die Erstellung hat sich aber auf dem Hintergrund des Gesamtprojektes als zu aufwändig herausgestellt.

Ebenfalls problematisch war das Herankommen an brauchbares Rohdatenmaterial. Das Material war zwar exzellent eingemessen, es bleibt aber zu konstatieren, dass insbesondere die Wiederholungsmessung von Kronenablotungen unpräzise ist. Als Ergebnis dieser Arbeit kann man feststellen, dass es von großem Vorteil sein kann, selbst die Daten zu erheben, die man benötigt. Zum anderen ist es essentiell, dass bei der Ablotung von Kronenradien zusätzlich der Azimut der aufnehmenden Person zum Probestaum mit aufgenommen wird. Zusätzlich waren die Markierungen, die Frau Duchiron 1995 an den Bäumen angebracht hatte, durch Außeneinflüsse entfernt worden. Es war daher nötig, die Positionen der Bäume zu rekonstruieren, was einige Zeit in Anspruch nahm und nur unter Zuhilfenahme von etwas Glück und Geduld gelang. Auch hier war *GroDisc* eine Hilfe, da man über den Abstand und den Azimut der nächsten Nachbarn die Positionen verifizieren konnte.

Das Kronenmodell hätte eigentlich besser eine Höhe der maximalen Ausdehnung der Krone beinhaltet. Da keine Daten diesbezüglich vorlagen, ließ sich das nicht umsetzen. Es hat sich aber

im Bestand schon gezeigt, dass einfache unregelmäßige Pyramiden als Abbildung der Kronenform der Kiefern nicht optimal sind. Die Berechnung der Abstände zu den Kronenoberflächen der nächsten Nachbarn muss also als leicht verzerrt angesehen werden.

Ursprünglich vorgesehen war ein Bestandesmodell, das eine aggregierte Version des Modells *LIGNUM* sein sollte. Die Parametrisierung und Simulationen sollten bei einem Finnlandaufenthalt vor Beginn des Projektes im Januar 2000 stattfinden. *LIGNUM* ist auch angewendet worden. Das finnische Modell war aber damals nicht in der Lage, mehr als einen Baum zu simulieren. Daher musste ein vereinfachtes Modell verwendet werden, das einen umgebenden Bestand repräsentiert.

Die *LIGNUM*-Kiefern zeigten in den Plausibilitätstests, dass eine Simulation über mehrere Jahrzehnte nicht sinnvoll ist. Die Simulation über 50 Jahre hat zwar vernünftige Werte in Bezug auf die Durchmesserentwicklung gezeigt, wenn man hohe Bestandesdichten um den Baum herum annahm. Die Durchmesserentwicklung stagnierte erstaunlicherweise bei etwa 16 Jahren, wenn die Bestandesdichte niedriger gesetzt wurde. Die Höhenentwicklung zeigte ebenfalls Abweichungen von der Realität. Sie stieg linear über die Jahre an, während „normale“ Kiefern einen sigmoiden Verlauf des Höhenwachstums aufweisen.

2.4 Ergebnisse

2.4.1 Rekonstruktion eines Bestandes

Die Rekonstruktion des Bestandes hat zwei Ergebnisbereiche: Die Ergebnisse der eigentlichen Messung und des Simulationslaufes der Rekonstruktion.

Die Hypothese besagte, dass der Wachstumsparameter BHD direkt und die Parameter Höhe und Kronenansatz indirekt über den BHD von der Ausdehnung der Krone abhängig sind. Dieses sollte mit einem Modell rekonstruiert werden. Die Messergebnisse sollten dieses unter- oder widerlegen. Die Messungen haben zum einen die Homogenität des Bestandes widergegeben. Die Parameter sind alle normalverteilt, was zusätzlich bestätigt, dass dieser Bestand klassisch behandelt worden ist. Natur- oder auch Plenterwälder sind nicht normalverteilt. Interessant ist auch, dass die Zuwachsraten der Kronenausdehnung trotz Durchforstung zurückgingen.

Um die oben genannte Hypothese zu unterlegen, wurden an den Parametern Korrelationsanalysen durchgeführt, und zwar sowohl an den temporär statischen Zuständen 1995 und 2001 als auch an den Zuwächsen. Es war von vornherein klar, dass die Zuwächse geringere Korrelationen aufweisen müssen, da die Zuwächse eine Kombination von Zufallsvariablen sind. Die Analyse hat aufgezeigt, dass die vermuteten Zusammenhänge zu den Zeitpunkten 1995 und 2001 tatsächlich existieren. Eine an den Daten durchgeführte Regressionsanalyse hat signifikante lineare Zusammenhänge zwischen BHD und mittlerer Kronenausdehnung und zwischen BHD und Höhe bzw. BHD und Kronenansatz aufgezeigt. Ganz anders bei den Zuwächsen. Die Zusammenhänge waren nicht nur unpräziser, es ließen sich keine signifikanten Zusammenhänge aufzeigen.

Signifikante Zusammenhänge existierten aber einzeln für jeden Parameter zwischen der Ausgangssituation in 1995 und den jährlichen Zuwachsraten. Es ließ sich etwa ein linearer Zusammenhang zwischen dem BHD von 1995 und der Zuwachsraten bestimmen. Der Anteil der erklärten Varianz ist bei allen Parametern allerdings nicht höher als 0,17. Es ist daher für die Rekonstruktion ein besonderer Augenmerk auf die Verteilung der Residuen gelegt worden, die bei allen Regressionen normalverteilt ist.

Ein wesentlicher Punkt war die Analyse der Abstände zwischen den Kronen. Es ist versucht worden, den Ansatz von Pretzsch (1992) umzusetzen, der für die Baumart Rotfichte parametrisiert ist. Die Kiefer hat im Gegensatz zur Fichte kein Zurückweichverhalten aufgezeigt. Zu-

mindest ließ sich das aus den Daten nicht nachvollziehen. Es ist aber im Mittel eine minimale negative Distanz aufgetreten. Das bedeutet, dass die Kiefernkronen im Bestand keine Überlappung von mehr als 1.5 Metern aufwiesen.

Auf der Grundlage dieser Daten ist ein L-System erstellt worden, welches das gemessene Wachstum nachstellen sollte. Die Ergebnisse sind den 2001 gemessenen sehr ähnlich. Der t-Test, der feststellen sollte, ob die simulierten Werte aus einer anderen Grundgesamtheit stammen, hat keine signifikanten Unterschiede zwischen den Mittelwerten ergeben.

2.4.2 Modellaggregation

Die Ergebnisse der Modellaggregation unterteilen sich in die Ergebnisse für die Sensitivitäts- und Plausibilitätstests und die eigentlichen Modellergebnisse.

Die Sensitivitäts- und Plausibilitätstests unterteilen sich in den „Alterungs- und Lichtregimeversuch“ und den Tests an einer jüngeren Kiefer. Die erstere Untersuchung hat verschiedene Ergebnisse hinsichtlich ihrer Interpretation gebracht. Da sei zuerst der zeitliche Verlauf des Simulationsablaufes genannt. Der Kronenansatz verläuft sehr sprunghaft. Er „zappelt“, wenn dieser Ausdruck hier gestattet ist, sehr stark. Die Kronenausdehnung hingegen verläuft plausibel. Da sich die Umstände um den Baum herum nicht ändern, verläuft die Steigerungsrate der Kronenausdehnung linear ansteigend. Dasselbe gilt für die Höhe des Baumes. Der lineare Verlauf ist hier allerdings etwas unplausibel, verläuft die Wachstumskurve bei realen Bäumen doch sigmoid und nicht linear. Bei sehr starken Dichten um den Baum herum verläuft die Durchmesserentwicklung durchaus normal und sigmoid. Bei niedrigeren Dichten (immerhin 5000 und weniger Bäume pro Hektar) stagniert die Durchmesserentwicklung. Insgesamt ist es aber plausibel, dass jede Wachstumsrate geringer ist, je dichter der Bestand rund um den Baum angenommen wird. Verglichen mit dem Realbestand sind die Größenordnungen von BHD und Höhe im Stadium von 50 Jahren durchaus im Rahmen des Möglichen. Die Kronenausdehnung ist um zwei Drittel zu niedrig (maximal 50 cm gegenüber 150 cm im Mittel im Realbestand).

Die Ergebnisse der Simulation unter Schirm haben die erwarteten Ergebnisse erbracht. Die Simulation unter einem geschlossenem Dach hat die virtuelle Kiefer virtuell sterben lassen. Das Wachstum endete nach zwei bis drei Jahren, je nachdem, wie dicht der Bestand um den Baum herum angenommen war. Das Loch im Kronendach muss auch mindestens einen Durchmesser von 13 Metern haben, damit überhaupt Wachstum stattfinden kann. Ist das Loch groß genug, zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang von Durchmesser und Höhenwachstum zur Position des Baumes zum Rand des Loches hin. Je näher der Baum am Rand steht, desto geringer die Wachstumsraten. Die Dimensionen des Baumes sind durchaus realistisch.

2.5 Diskussion im Hinblick auf den Forschungsstand

Die Diskussion im Hinblick auf den Forschungsstand bezieht sich auf drei Punkte: Die Analysesoftware *GroDisc*, die Rekonstruktion des Baumbestandes mit Hilfe von L-Systemen und die Verjüngungsmodellierung durch die Aggregation einer *LIGNUM*-Kiefer.

2.5.1 *GroDisc*

Die Software bzw. Bibliothek *GroDisc* hat sich als sehr flexibles und nützliches Werkzeug in der Analyse von Bestandes- und Baumarchitekturen erwiesen. Die Datenstruktur hat die Dekompositions-, Geometrie- und Topologieinformation sehr gut abgebildet. Einziger Nachteil ist die strikte thematische Trennung der Primitive nach dem Typ des Primitives. So ist es nicht möglich, einen Baum mit Zylindern und Dreiecken gleichzeitig abzubilden. Das geht nur über

Verschneidungsoperationen. Man muss also einen zweiten Layer vorhalten, der die Stamminformation bereithält. Die Erstellung von Analyse- und Diskretisierungsalgorithmen ist durch das *STL*-Konzept wesentlich erleichtert worden. Es ist zwar etwas gewöhnungsbedürftig in der Programmierung, ist aber letztendlich sehr übersichtlich und unterstützt die Anforderung, transparent zu sein.

Die Datenschnittstellen zu *R* und *AMAPmod* haben sich als außerordentlich nützlich erwiesen. Ausschließlich die Software *R* ist nach der Etablierung der Schnittstelle zu statistischen Analysezielen verwendet worden, auch wenn in der Publikation Dzierzon et al. (2003) noch *STATISTICA* und *SAS* zur Anwendung kamen. Prinzipiell ermöglicht die Datenbankschnittstelle bzw. die Möglichkeit, Daten als Tabelle abzulegen, auch den Einsatz dieser Statistikwerkzeuge.

Die Schnittstelle zu *LIGNUM* hat viele Analysen erst möglich gemacht. So wäre die Analyse des Wasserflusses innerhalb einer *LIGNUM*-Kiefer ohne die Schnittstelle nicht möglich gewesen. Da dies auch eine Schnittstelle zu *GROGRA* bzw. *HYDRA* ist, wäre eine Kopplung der Modelle durchaus denkbar.

2.5.2 L-Systeme

Die Anwendung von L-Systemen in der Bestandesmodellierung insbesondere mit vereinfachten Kronenstrukturen ist zwar ungewöhnlich, aber sehr nützlich gewesen. Ungewöhnlich, weil der String-Rewriting-Prozess keine Verlängerung des Charakter-Strings zur Folge hatte, wie es normalerweise üblich ist. Dennoch hat sich herausgestellt, dass es nicht nur prinzipiell möglich sondern auch sinnvoll ist, sich des überflüssigen Computercodes zu entledigen und sich bei der Umsetzung von Bestandesmodellen auf das wesentliche zu konzentrieren.

Es hat sich bei der Anwendung der L-Systeme deutlich gezeigt, dass es sinnvoll ist, mehr als nur Zylinder als geometrische Körper zur Verfügung zu haben. Die Dreiecke haben sich bewährt. Es wäre daher wünschenswert, wenn sich der Kreis der geometrischen Körper erweitern würde um etwa Polygone oder Kugeln. Auch die sensitive Abstandsfunktion hat sich im Einsatz bewährt. Sie hat aber den Nachteil, stellenweise zu große Abstände zu berechnen. Das liegt daran, dass diese Funktion — wie auch schon die Berechnung desselben Abstands in Pretzsch (1992) — nicht berücksichtigt, dass eine Einheit niedriger liegen kann als der Kronenansatz des nächsten Nachbarn. Die Funktion „unterschießt“ dann die Kronen des nächsten Nachbarn. Dies hatte in diesem Fall keine Wirkung, weil nur der Minimalabstand in die Rekonstruktion des Realbestandes einging, sollte aber korrigiert werden.

Als ebenfalls sehr nützlich haben sich die Lichtkegelfunktionen erwiesen, die den Lichtgenuss eines Baumes berechnen sollen, der von einem Bestand überschirmt ist. Sie sind etwas einfacher konzipiert als das Lichtmodell von *LIGNUM*. Die Funktionen berücksichtigen im Gegensatz zu *LIGNUM* nur einen Himmel mit gleichen Helligkeiten in allen Himmelsrichtungen.

2.5.3 Rekonstruktion des Realbestandes

Die Rekonstruktion des Realbestandes konnte ohne signifikante Abweichungen zwischen den simulierten und realen Werten vollzogen werden. Die Abstandssensitivität unterschied sich von dem Ansatz von Pretzsch (1992). Es konnte kein potentiell maximales Wachstum und das daraus resultierende Zurückweichen der Kronen in Abhängigkeit vom Überlappungsgrad festgestellt werden. Es existierte lediglich eine maximale Überlappung, nach der das Kronenwachstum stagniert.

2.5.4 Verjüngungsmodell

Das Verjüngungsmodell ist in Bezug auf den Forschungsstand neu. Die Aggregation von *LIGNUM*-Kiefern hat realistische Ergebnisse erbracht. Es wäre von großer Bedeutung, diese Ergebnisse zu validieren. Dazu wären Naturverjüngungsmessungen notwendig. Ein Vergleich mit drei vermessenen Kiefern, deren Wachstumsgeschichte unbekannt ist, reicht da sicherlich nicht aus.

Das Modell ist noch nicht sensitiv hinsichtlich direkter Nachbarn. Es war nicht ganz klar, wie man eine den Baum umgebende Bestandesdichte in einem L-System abbilden kann. Dazu wäre es notwendig, eine sensitive Funktion einzuführen, die die Umgebung nach nächsten Nachbarn absucht. Das ist prinzipiell möglich, aber noch nicht umgesetzt.

Der Vergleich zwischen den durch das L-System simulierten Bäumen und den Ursprungsbäumen hat keine nennenswerten Unterschiede ergeben. Das L-System hat den Baum gemäß des Abstands zum Rand des Loches hin deutlich kleiner werden lassen, wie es ja auch Vorgabe des *LIGNUM*-Baumes war. Interessant ist, dass die Verwendung der nichtgewichteten sensitiven Funktion 15 größere Bäume hervorgebracht hat.

2.6 Wirtschaftliche Verwertbarkeit

Die wirtschaftliche Verwertbarkeit der in dem Projekt entstandenen Software wird langfristig angestrebt. In dem jetzigen Stadium ist die Software zwar sehr generalisiert aufgebaut und hat Aspekte von einem 3D GIS, beinhaltet dennoch einen Schwerpunkt in der Analyse von Baumbestandesarchitekturen und wird in nächster Zukunft eher innerhalb der Arbeitsgruppe Pflanzenmodellierung am Institut für Forstliche Biometrie und Informatik oder in Arbeitsgruppen mit ähnlicher Ausrichtung (wie z.B. die AG Pflanzenmodellierung der METLA) zu Forschungszwecken angewendet.

2.7 Kooperation und Präsentation der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projektes sind auf Tagungen und Meetings präsentiert worden. National existiert ein jährlich stattfindender Workshop mit dem Titel „Workshop on Individual-based Models and Structural-Functional Models in Ecology“. Auf dem siebten und achten Treffen sind Ergebnisse in Form von Vorträgen präsentiert worden. Zum achten Workshop ist zusätzlich ein Tagungsband entstanden, in dem wir veröffentlicht haben (Dzierzon und Kurth 2002).

International waren wir auf der Tagung „Third International Workshop on Functional-Structural Tree and Stand Models“ (Montréal, Kanada) im Oktober 2001 mit einem Vortrag vertreten.

Die abschließenden Ergebnisse sind auf dem Meeting „Hierarchical treatment of multi-scale processes in tree and stand models“ an der Universität Helsinki (26.–27. 2. 2002) präsentiert worden.

Es hat innerhalb der Arbeitsgruppe Pflanzenmodellierung Kooperationen mit zwei anderen DFG-Projekten gegeben. Der Bearbeiter dieses Projektes ist auf verschiedenen Meetings als Mitautor auf Postern vertreten gewesen.

Die Arbeitsgruppe Pflanzenmodellierung am Institut für Forstliche Biometrie und Informatik der Universität Göttingen, an dem dieses Projekt angesiedelt ist, hat eine Vielzahl von nationalen und internationalen Kooperationspartnern. Mit mehreren dieser Partner ist die Zusammenarbeit im Vorfeld und im Laufe dieses Projektes vertieft worden. So hat der Bearbeiter einleitend einen viermonatigen Auslandsaufenthalt an der Finnischen Forstlichen Versuchsanstalt (METLA) in Vantaa und an der Universität Helsinki geleistet. Die Ergebnisse dieses Aufenthaltes sind in dieses Projekt eingeflossen. Im Zuge dieser Kooperation ist eine Veröffentlichung

in *Silva Fennica* entstanden (Dzierzon et al. 2003). Im Rahmen des oben genannten Meetings an der Universität Helsinki hat der Verfasser erneut die METLA aufgesucht, um die durch die Zusammenarbeit entstandenen Ergebnisse abschließend zu beraten.

Das CIRAD in Montpellier, das schon lange Kooperationspartner unserer Arbeitsgruppe ist, hat dazu beigetragen, dass die Publikationen Dzierzon und Kurth (2002), Knauff et al. (2001) und die Dissertation von Knauff (2000) entstanden. Das CIRAD hat die Software *AMAPmod* zur Verfügung gestellt und uns bei Fragen der Anwendung unterstützt.

Es hat eine Kooperation mit dem Institut für Forstbotanik gegeben. Die innerhalb des Projektes entstandene Software (*GroDisc*) ist in der Publikation Oppelt et al. (2000) angewendet worden. Die Ergebnisse dieses Projektes sind ebenfalls auf einer Tagung in Form eines Posters vorgestellt worden.

Zu nennen ist auch hier die Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt Göttingen, die uns freundlicherweise Daten und Messgeräte zur Verfügung gestellt hat.

Wichtig für unsere Arbeit ist die Zusammenarbeit mit dem „Laboratoire de Recherches en Sciences Forestières, Unité Ecosystèmes Forestiers et Dynamique du Paysage“ in Nancy (ENGREF), Frankreich. Eine dortige Wissenschaftlerin hat wichtige Daten bereitgestellt. Wir haben im Gegenzug Software erstellt, die in der Dissertation von Duchiron (2000) benutzt wurde. Bei der Verteidigung der Dissertation an der Universität Nancy war der Bearbeiter des Projektes als eingeladener Sachverständiger anwesend.

Im Rahmen des Projektes ist eine Dissertation entstanden, die kurz vor dem Abschluss steht.

3 Zusammenfassung

Das vorliegende Projekt beschäftigt sich mit der Modellierung von Baum- und Baumbestandeswachstum als Teil der Pflanzenmodellierung. Klassische forstliche Modellansätze betrachten nur einzelne Variablen wie Höhe und BHD und sind ungeeignet für heterogene Bestände oder für Simulationsläufe unter veränderten Umweltbedingungen. Deshalb wurden in letzter Zeit verstärkt individuenbasierte Ansätze verfolgt, die räumliche Strukturen bis hin zu Architekturmerkmalen einzelner Baumindividuen berücksichtigen und eine realistischere Modellierung von Konkurrenzeffekten ermöglichen. Dies erhöht aber auch die Anforderungen an die Analyse von Daten - wobei sowohl empirische (Bestandesstruktur- und Baumarchitektur-) Daten als auch Modellergebnisse zu analysieren und zu vergleichen sind. Darüberhinaus stellt sich mit dem Aufkommen sehr komplexer, laufzeitintensiver Struktur-Funktions-Modelle von Bäumen verstärkt das Problem der Modell-Aggregation, das heißt des Designs vereinfachter Modelle, die wesentliche Verhaltensmerkmale des komplexen Modells in aufbereiteter Form (z.B. als Regelsystem) bereitstellen, weniger Rechenzeit benötigen und somit effektiv auf realistische Bestandesgrößen angewandt werden können. Erstes Ergebnis unseres Projekts ist die Implementation eines Analysewerkzeugs, der Software *GroDisc*, die Beschränkungen bisheriger Pflanzenanalyse-Tools (z.B. *AMAPmod*) überwindet und insbesondere eine Transformation zwischen topologisch orientierter Pflanzenrepräsentation (im Sinne modularer Architektur) und gitterbasierten Ansätzen (voxel space, Polarkoordinatengitter), wie sie in zahlreichen Arbeiten, auch zur fraktalen Analyse, gebraucht werden, ermöglicht. Diese Software verwendet eine auf das Problemfeld zugeschnittene interne Datenstruktur, die sich konzeptionell an *GIS* (Geografischen Informationssystemen) orientiert. Es können Baum- und Bestandesarchitekturen repräsentiert werden, wobei unter „Architektur“ sowohl Geometrie-, als auch Topologie- und Dekompositionsinformation zu verstehen ist. Die gewählte Datenstruktur unterstützt Algorithmen, die die Architekturen analysieren oder diskretisieren. *GroDisc* ist objektorientiert umgesetzt und verwendet eine Klassenhierarchie, die Listenbaumstrukturen unterstützt. Die Geometrie orien-

tiert sich am Ansatz der „constructive solid geometry“ aus der Computergrafik. *GroDisc* besitzt eine Vielzahl von Datenschnittstellen zu anderen Software-Werkzeugen: Im Bereich der Modellierung zu *LIGNUM* und *GROGRA*, im Bereich der Datenanalyse zur Statistiksoftware *R* und zu *AMAPmod*, im Datenbankbereich wird *MySQL* unterstützt. Zweites Ergebnis ist eine erfolgreich durchgeführte Modell-Aggregation am Beispiel des Struktur-Funktions-Modells *LIGNUM* (Perttunen et al., METLA, Finnland). Als Ziel-Formalismus für das vereinfachte Modell wurden L-Systeme benutzt, da sie eine verbesserte Transparenz, Nachvollziehbarkeit und Editierbarkeit der Modelle gegenüber den üblichen prozeduralen und objektorientierten Modell-Implementierungen versprechen. L-Systeme wurden bisher vorwiegend für Einzelpflanzen eingesetzt; in diesem Projekt wurden sie erstmals zur Modellierung von Konkurrenz in realistischen, forstlichen Beständen verwendet. Die L-System-Spezifikation der Software *GROGRA*, die in unserer Arbeitsgruppe entwickelt wurde, wurde zu diesem Zweck um einen neuen Befehl und zwei sensitive Funktionen erweitert, die es ermöglichen, ein Kronenkonkurrenzmodell mit polyedrischen Kronen, das sich an einem früheren Ansatz von Pretzsch orientiert, als sensitive Wachstumsgrammatik umzusetzen. Zusätzlich kam eine sensitive Funktion zum Einsatz, die den Abdeckungsgrad eines diskretisierten bedeckten Himmels berechnet und damit die Wirkung von Überschirmung auf die Entwicklung individueller Kronen simuliert. Zu Testzwecken wurde in dem Projekt ein ca. 50-jähriger Kiefernbestand eingemessen (Wiederholungsmessung einer schon vor 6 Jahren erfolgten Kronenablotung). Diese Daten wurden benutzt, um eine individuenbasierte Rekonstruktion des Bestandes mit Hilfe einer Wachstumsgrammatik umzusetzen und das Kronenkonkurrenzmodell zu testen. Zur Modellierung von Naturverjüngung wurde das finnische Modell *LIGNUM* dahingehend erweitert, dass die Lichtreduktion durch einen überschirmenden Bestand abgebildet werden kann. Die Überschirmung kann ein regelmäßiges Loch aufweisen (Simulation von Naturverjüngung in femelartigen Waldstrukturen). Das modifizierte Modell wurde auf seine Plausibilität und Sensitivität hin untersucht und verspricht, mittelfristig einsetzbar zu sein (müsste dann allerdings noch um eine Konkurrenz-Komponente innerhalb der Verjüngung erweitert und anhand von Daten aus realer Kiefern-Naturverjüngung validiert werden). Eine Analyse der Modell-Kiefern im Vergleich mit realen, detailliert vermessenen Bäumen desselben Alters (im Hinblick auf Fraktalität, Tapering, pipe model und Wasserpotenzial-Verteilung im Baum) zeigte exemplarisch die Möglichkeiten, die die Kopplung verschiedener Software-Werkzeuge eröffnen. Bei der Umsetzung des aggregierten Modells kamen wiederum sensitive Wachstumsgrammatiken in der *GROGRA*-Variante zum Einsatz. Die Überschirmung wurde hier mit Hilfe einer trickreichen, aber einfach zu spezifizierenden geometrischen Konstruktion auf der Grundlage vorhandener *GROGRA*-Elemente realisiert. Als besonders aufwändig erwies sich im Laufe des Projekts die Arbeit an der Fremdsoftware *LIGNUM* sowie die Rohdatenbeschaffung unter der Anforderung aussagekräftiger Wiederholungsmessungen von Kronenablotungen. Lücken in den Datenbeständen und bei den Fähigkeiten von *LIGNUM* (in der bisherigen Version kann nur ein einziger Baum dynamisch simuliert werden) haben zu Verzögerungen geführt. Es konnten aber verschiedene Ergebnisse auf internationalen Kongressen vorgestellt und publiziert werden, und die entwickelte Software wurde auch bereits in anderen Projekten (Wurzelforschung) vorteilhaft eingesetzt.

Literatur

U. Breymann. *Designing Components with the C++ STL. A new approach to programming.* Addison-Wesley, 1998.

Y. Chiba. Mathematical model of stem formation and tree architectural development. In H-C.

- Spatz und Th. Speck, editors, *Plant Biomechanics 2000. Proc. 3rd Plant Biomechanics Conf. Freiburg Badenweiler 27. 8.-2. 9. 2000*, pages 606–612, Stuttgart, 2000. Thieme.
- J.A. den Dulk. *The interpretation of remote sensing, a feasibility study*. PhD thesis, University of Wageningen, Netherlands, 1989.
- M.-S. Duchiron. *Analyse de la structure des forêts irrégulières et mélangées sur les landes sableuses non hydromorphes de l'Allemagne du nord*. PhD thesis, l'école du Génie Rural, des Eaux et des Forêts, Nancy, France, 2000.
- H. Dzierzon und W. Kurth. LIGNUM: A Finnish tree growth model and its interface to the French AMAPmod database. In F. Hölker, editor, *Scales, hierarchies and emergent properties in ecological models*, Theorie in der Ökologie 6, pages 95–104. Peter Lang Verlag, Frankfurt/M., 2002.
- H. Dzierzon, J. Perttunen, W. Kurth, R. Sievänen, und B. Sloboda. Enhanced possibilities for analyzing tree structure as provided by an interface between different modelling systems. *Silva Fennica*, 37(1):31–44, 2003.
- Ch. Eschenbach. The effect of light acclimation of single leaves on whole tree growth and competition – an application of the tree growth model ALMIS. *Annals of Forest Science*, 57: 599–609, 2000.
- C. Godin. Representing and encoding plant architecture. A review. *Annals of Forest Science*, 57:413–438, 2000.
- C. Godin, Y. Guédon, und E. Costes. Exploration of a plant architecture database with the AMAPmod software illustrated on an apple tree hybrid family. *Agronomie*, 19:163–184, 1998.
- M. Guericke. *Untersuchungen zur Wachstumsdynamik von Mischbeständen aus Buche und Europ. Lärche (Larix decidua, Mill.) als Grundlage für ein abstandsabhängiges Einzelbaumwachstumsmodell*. PhD thesis, Universität Göttingen, 2001.
- F.-J. Knauff. *Entwicklung von Methoden zur GIS-gestützten Visualisierung von Waldentwicklungsszenarien*. PhD thesis, Fakultät für Forstwissenschaft und Waldökologie, Universität Göttingen, 2000.
- F.-J. Knauff, B. Sloboda, und W. Kurth. Modellintegration bei der Erzeugung virtueller Waldlandschaften. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung*, 172(8/9):161–168, 2001.
- H. Kramer. *Grundlagen zur forstlichen Ertragskunde*. Selbstverlag, third edition, 1984.
- W. Kurth. *Die Simulation der Baumarchitektur mit Wachstumsgrammatiken*. Wissenschaftlicher Verlag, Berlin, 1999.
- W. Kurth und G.A. Anzola Jürgenson. Triebwachstum und Verzweigung junger Fichten in Abhängigkeit von den beiden Einflußgrößen Beschattung und Wuchsdichte: Datenaufbereitung und -analyse mit GROGRA. In D.R. Pelz, editor, *Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Forstliche Biometrie und Informatik, 10. Tagung, Freiburg i.Br., 24.–28.9.1995, Ljubilana, Biotechnische Fakultät*, pages 89–108, 1997.
- W. Kurth und B. Sloboda. Tree and stand architecture and growth described by formal grammars — I. Non-sensitive trees. *J. For. Sci.*, 45:16–30, 1999a.

- W. Kurth und B. Sloboda. Tree and stand architecture and growth described by formal grammars — II. Sensitive trees and competition. *J. For. Sci.*, 45:53–63, 1999b.
- R. List, M. Küppers, und F. Schröder. Madeira – ein Programm zur Simulation des Wachstums (Biomasse und Architektur) von Holzgewächsen. In *Verhandlungen der Gesellschaft für Ökologie*, 23, pages 39–48, Innsbruck, 1994.
- T.A. McMahon und E. Kronauer. Tree structure: deducing the principle of mechanical design. *Journal of Theoretical Biology*, 59:443–466, 1976.
- J. Nagel, M. Albert, und M. Schmidt. *BWINPro Programm zur Bestandesanalyse und Prognose. Handbuch zur Version 5.1*. Niedersächsische Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen, 2000.
- J. Nagel und S. Wagner. Zur Simulation von Naturverjüngung. In *Tagungsberichte der Arbeitsgruppen Ökologie, Räumliche Statistik. Deutsche Region der Internationalen Biometrischen Gesellschaft*, 16.-17.10.1997, volume 9, pages 70–75, 1998.
- A.L. Oppelt, W. Kurth, H. Dzierzon, G. Jentschke, und D.L. Godbold. Structure and fractal dimensions of root systems of four co-occurring fruit tree species from Botswana. *Annals of Forest Science*, 57(5/6):463–475, 2000.
- J. Perttunen, R. Sievänen, und E. Nikinmaa. LIGNUM. A model combining the structure and the functioning of trees. *Ecological Modelling*, 108:189–198, 1998.
- J. Perttunen, R. Sievänen, E. Nikinmaa, H. Salminen, H. Saarenmaa, und J. Väkevä. LIGNUM: a tree model based on simple structural units. *Annals of Botany*, 77:87–98, 1996.
- J. Pfreundt. Modellierung der räumlichen Verteilung von Strahlung, Photosynthesekapazität und Produktion in einem Fichtenbestand und ihrer Beziehung zur Bestandesstruktur. In *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme*, volume A 39, Göttingen, 1988.
- J. Pfreundt und B. Sloboda. The relation of local stand structure to photosynthetic capacity in a spruce stand: a model calculation. *Lesnictví-Forestry*, 42:149–160, 1996.
- M. Pfund. A topological data structure 3D GIS architecture. *GIM International*, February 2002, 16(2), 2002.
- H. Pretzsch. Kronenformen und ihre Veränderung unter Konkurrenz. In *Deutscher Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde. Jahrestagung Grillenburg 1992*, pages 40–61, 1992.
- H. Pretzsch. *Modellierung des Waldwachstums*. Parey Buchverlag, Berlin, 2001.
- M. Prodan. *Holzmesslehre*. J.D. Sauerländer's, Frankfurt, 1965.
- P. Prusinkiewicz, R. Karwowski, R. Mech, und J. Hanan. L-studio/cpfg: a software system for modeling plants. *Lecture Notes in Computer Science*, 1779:457–464, 2000.
- P. Prusinkiewicz, R. Karwowski, J. Perttunen, und Sievänen R. Specification of L - a plant modelling language based on Lindenmayer systems. Version 0.5. *University of Calgary, Department of Computer Science, Research note*, 1999.
- P. Prusinkiewicz und A. Lindenmayer. *The algorithmic beauty of plants*. Springer, New York, 1990.

- B. Sloboda und J. Pfreundt. Tree and stand growth. A system analytical spatial model with consequences for test planning for thinning and single tree development. In *Artificial intelligence and growth models for forest management decisions*, Publication No. FWS-1-89, Blacksburg, Virginia, 1989.
- H. Sterba, M. Moder, und R. Monserud. Prognaus – Ein Waldwachstumssimulator für Rein- und Mischbestände. *Österreichische Forstzeitung*, 5:19–20, 1995.
- B. Stroustrup. *Die C++ Programmiersprache*. Addison-Wesley, Bonn, third edition, 1998.

4 Unterschriften

(Prof. Dr. W. Kurth)

(Prof. Dr. Dr. h.c. B. Sloboda)

5 Verzeichnis der Anlagen

Die Anlagen können bei der DFG verbleiben.

- Veröffentlichungen aus dem Projekt.