

ALLGEMEINE FORST UND JAGDZEITUNG

ISSN 0002-5852

Sonderdruck

INHALTSVERZEICHNIS

AUFSÄTZE

M. Kahn	Die Fuzzy Logik basierte Modellierung von Durchforstungseingriffen (Modelling thinning regimes with a fuzzy logic controller)	169
W. Kurth und D. Lanwert	Biometrische Grundlagen für ein dynamisches Architekturmodell der Fichte (<i>Picea abies</i> (L.) KARST.) (Biometrical foundations for a dynamical architectural model of spruce (<i>Picea abies</i>) (L.) KARST.)	177
J. Nagel und G. S. Biging	Schätzung der Parameter der Weibullfunktion zur Generierung von Durchmesserverteilungen (Estimation of the parameters of the Weibull function for generating diameter distributions)	185
H. Pretzsch	Zum Einfluß des Baumverteilungsmusters auf den Bestandeszuwachs (On the effect of the spatial distribution of trees on the stand growth)	190
BUCHBESPRECHUNGEN		201
NOTIZ		204

166. JAHRGANG 1995 HEFT 9/10 SEPT./OKT.

.D. SAUERLÄNDER'S VERLAG FRANKFURT AM MAIN

Die Fuzzy Logik basierte Modellierung von Durchforstungseingriffen

Aus dem Lehrstuhl für Waldwachstumskunde, Ludwig-Maximilians-Universität München

(Mit 9 Abbildungen)

Von M. KAHN¹⁾

(Angenommen Januar 1995)

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Durchforstungsmodell; Durchforstungsregeln; Regelmenge; Fuzzy Logik; Fuzzy Control; Einzelbaumwachstumssimulator.

Thinning model; thinning rules; rule base; fuzzy logic; fuzzy control; single tree growth simulator.

1. EINLEITUNG

1.1. Wachstumssimulation und Durchforstung

Waldwachstumssimulatoren dienen der modellhaften, computer-gestützten Nachbildung des Wachstums von Baum und Bestand. Der baumpositionsabhängige Simulator SILVA von PRETZSCH (1992) beschreibt das Baumwachstum in Abhängigkeit von dessen räumlicher Konkurrenz, die durch Beschattung und seitliche Einengung des betrachteten Baumes hervorgerufen wird. Vom Wachstum des Baumes im Hinblick auf seine Höhe und seinen Stammdurchmesser kann durch Aggregation der Einzelbaumgrößen auf Bestandessummen- und Bestandesmittelwerte geschlossen werden (z. B. Bestandesvolumen, Bestandesgrundfläche, dg, hg). Die Modellierung des Baumwachstums zielt dabei insbesondere darauf ab, treffgenaue Wachstumsprognosen auch für reich strukturierte Rein- und Mischbestände zu ermöglichen, die sowohl flexiblen Behandlungsmaßnahmen als auch Standortänderungen unterworfen sein mögen und für die Ertragstafelprognosen nicht geeignet oder nicht möglich sind.

Die wesentlichen, das Wachstum von Baum und Bestand determinierenden und modellierbaren Merkmale sind der Standort sowie die Bestandesstruktur bzw. die Wuchskonstellation des Einzelbaumes. Für die Nachbildung des Höhenwachstums von Buche, Eiche, Kiefer und Douglasie in Abhängigkeit vom Standort wurde daher von KAHN (1994) ein zur Implementierung in einen Einzelbaumwachstumssimulator geeignetes Modell entwickelt. Zur Erzeugung der Ausgangsstruktur eines Bestandes hat PRETZSCH (1993) das Modell STRUGEN entworfen, mit dem es möglich ist, aufgrund verbaler Eingabegrößen aus der Bestandesbeschreibung (z. B. Einzelbaum- oder Gruppenmischung) realitätsnahe Startwerte für die räumliche Verteilung der Bäume zu Beginn eines Simulationslaufes mit dem Simulator SILVA zu erzeugen. Die Bestandesstruktur verändert sich dabei im Laufe der Zeit durch Wachstum z. B. an Baumhöhe, Stamm- und Kronendurchmesser, durch das Hinzukommen neuer Bestandessglieder (Naturverjüngung, Pflanzung) sowie durch natürliche Mortalität (z. B. pathogen bedingt oder durch Windwurf) und in Wirtschaftswäldern vor allem durch die Durchforstung. Der folgende Beitrag befaßt sich mit einem Modellansatz zur Nachbildung von Durchforstungseingriffen, der zur Implementierung in baumpositionsabhängige Einzelbaum-Wachstumssimulatoren geeignet ist.

1.2. Durchforstung als Entscheidungsproblem

Die Modellierung der Durchforstung zeichnet sich unter einem entscheidungstheoretischen Blickwinkel vor allem durch drei Problemfelder aus: Erstens ist Durchforstung normativ, zweitens ist sie intrinsisch unscharf und drittens ist sie mehrkriteriell. Die normative Eigenschaft von Durchforstungseingriffen ist evident, denn die Durchforstungsvorschriften sind definitorisch z. B. festgelegt im Versuchsplan des Vereins Forstlicher Versuchsanstalten von 1902 (ASSMANN, 1961), in den Baumzahlleitkurven nach ABETZ (1975) oder auch der „Bramwalder Durchforstung im Herrschenden“ nach MICHAELIS (1907). Die intrinsische Unschärfe der Durchforstung ergibt sich zum einen aus den unscharfen Vorgaben der Durchforstungsvorschriften (mit einer geradezu normativen Unschärfe) und andererseits damit zusammenhängend daraus, daß die Entnahme einzelner Bäume unter subjektiven Kriterien erfolgt sowie unter Berücksichtigung der (unscharfen) Durchforstungsregeln. Intrinsisch unscharf bedeutet also, daß es unüblich ist, bei der Durchforstung zur exakten Messung geeignete Hilfsmittel wie Kluppe, Zuwachsbohrer und Höhenmesser zu verwenden. Stattdessen ist meist ausschließlich entscheidend die okulare Einschätzung von relativen Baumdimensionen (relativ zum Bestand sowie zur näheren räumlichen Umgebung) und der baumindividuellen Umgebungsstruktur (Konkurrenz des Baumes um Raum und Licht). Damit ist die mehrkriterielle Eigenschaft des Entscheidungsproblems bei der Durchforstung (i. e. warum wird welcher Baum entnommen?) bereits angesprochen: Zur Begründung der Entnahme eines Baumes genügt selten ein einziges Kriterium (z. B. Zieldurchmesser), sondern meist sind es mehrere. Diese Kriterien bzw. die sie charakterisierenden Meßgrößen sind die Variablen, die zur Modellierung der Durchforstungsentscheidung herangezogen werden müssen.

1.3. Modellierungsziel und Modellansatz

Aus diesen Merkmalen der Durchforstung ergibt sich in erster Linie das Ziel, auch Durchforstungsregeln sinngemäß und plausibel im Durchforstungsmodell berücksichtigen zu können. Dies soll die flexible Einbindung unscharfer Entscheidungsvorschriften (einschließlich z. B. der „freien“ Durchforstung) mit ermöglichen. Alleine dieses Ziel schließt bei der Modellierung von Durchforstungseingriffen die für gleichaltrige Reinbestände geeigneten und z. B. von VON GADOW (1987) erfolgreich angewendeten Verteilungsansätze weitgehend aus, weil deren Übertragbarkeit auf stark strukturierte Rein- und Mischbestände und ihre im Sinne der Durchforstungsvorschriften plausible Interpretierbarkeit eher problematisch scheint. Neben diesem Ziel stehen, nicht weniger wichtig, die Ziele der treffgenauen Abbildung wirklicher Durchforstungseingriffe und die Nutzung des umfangreichen Datenmaterials aus dem forstlichen Versuchswesen des Lehrstuhls für Waldwachstumskunde der Universität München sowie die Implementierbarkeit des Durchforstungsmodells in einen baumpositionsabhängigen Einzelbaum-Wachstumssimulator.

Zur Realisierung dieser Ziele wird ein Algorithmus aufgestellt, dessen Kernmodul ein „Fuzzy Logik Controller“ (FLC) ist (ZIMMERMANN, 1991). Mit diesem Ansatz über den FLC wird erreicht, unscharfe Durchforstungsvorschriften regelbasiert umzusetzen. An Durchforstungskriterien werden ein von PRETZSCH (1994) entwickelter Konkurrenzindex (KKL) sowie die relative Summenhäufig-

¹⁾ Dr. MARKUS KAHN, M.O.R., ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Forstwissenschaftlichen Fakultät der LMU München; der Text entspricht der Langfassung eines Vortrages auf der 7. Tagung der Sektion Forstliche Biometrie und Infomatik im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten in Ljubljana, Grosuplje, 20. 9. 1994 bis 24. 9. 1994.

keit aus der empirischen Verteilungsfunktion der Baumdurchmesser in 1,3 m Baumhöhe (relativer BHD) herangezogen.

2. FUZZY LOGIK CONTROLLER

Nach ZIMMERMANN (1991) haben Expertensysteme und Fuzzy Logik Controller (FLC) sicher eines gemeinsam: Mit beiden soll menschliche Erfahrung und menschliches Entscheidungsverhalten nachgebildet werden. Expertensysteme haben dabei vorwiegend im nicht-technischen Bereich (z. B. in der Medizin) weite Verbreitung gefunden, FLC hingegen werden vorwiegend bei der Steuerung von technischen Prozeß- und Bewegungsabläufen eingesetzt. Von ROMMELFANGER (1993) wurden FLC-Verfahren mit Erfolg bereits auf nicht-technische Entscheidungsprobleme übertragen.

Fuzzy Logik Controller bestehen i. d. R. aus einer Wissensbasis (einer oft nur einfachen Regelmengen mit 5 bis 7 Regeln), einer Inferenzmaschine zur Auswertung der Regeln sowie aus Mechanismen zur Fuzzifizierung der Eingangsdaten und zur Defuzzifizierung der Ausgangsdaten. Der von dem FLC geregelte Prozeß ist hier der Vorgang der Durchforstung. In den nächsten Abschnitten wird gezeigt, wie ein solcher FLC funktioniert und wie er zur Modellierung von Durchforstungseingriffen eingesetzt wird.

2.1. Auswahl der Durchforstungskriterien

Die Eingangsdaten für den FLC werden dem Prozeß entnommen, zur regelbasierten Einschätzung des Prozeßzustandes zunächst fuzzifiziert, ausgewertet und dann zur Regelung des weiteren Prozeßverlaufes defuzzifiziert. In bezug auf die Durchforstung heißt dies, daß ein Baum anhand geeigneter durchforstungsrelevanter Variablen quantitativ erfaßt wird. Diese Meßgrößen werden dann als Eingabevariablen für den FLC mittels der Durchforstungsregeln, die in der Wissensbasis enthalten sind, so ausgewertet, daß eine zuverlässige Entscheidung über die Durchforstungsdringlichkeit des Einzelbaumes getroffen werden kann. Diese Durchforstungsdringlichkeit ist die Ausgabevariable des FLC. Wird ein Baum entnommen, so können sich die Zustandsgrößen für die verbliebenen Bäume ändern, z. B. weil ein Konkurrent (evtl. ein den Z-Baum bedrängender Konkurrent) weggefallen ist. Welche Baumgrößen sind nun geeignete Zustandsvariablen, welche Durchforstungskriterien sind geeignete Entscheidungsvariablen, die herangezogen werden müssen, um die Entscheidung über die Entnahme eines Baumes im Rahmen der Durchforstung beschreibbar und nachbildbar zu machen? Selbstverständlich sollte es sich um solche Variablen handeln, die bei der Einzelbaumsimulation ohnehin mitgeführt werden und nicht eigens für eine Durchforstung erst generiert oder zeitintensiv neu errechnet werden müssen.

2.1.1. Eingabevariable relativer Baumdurchmesser

Als ein erstes wichtiges Entscheidungskriterium wird der Baumdurchmesser gewählt, der am stehenden Baum zumeist in 1,3 m Höhe als Brusthöhendurchmesser (BHD) erhoben wird. Der BHD ist subjektiv in vager Dimension und verbaler Umschreibung („ein dicker Baum“) relativ leicht erfaßbar und für einen bestimmten Baum problemlos in Relation zu anderen Bäumen des Bestandes, insbesondere seinen Nachbarbäumen, zu setzen („dicker als seine Nachbarn“). Zudem ist der BHD mit zahlreichen weiteren Baumdimensionen, wie etwa der Baumhöhe oder dem Kronendurchmesser, eng korreliert und daher in mancherlei Hinsicht repräsentativ für die Charakterisierung der Konstitution des Baumes. Auch ist der BHD in dem Wachstumssimulator SILVA eine der wichtigsten Reaktionsgrößen, die für jede Simulationsperiode stets für jeden Baum abgreifbar ist und so nicht neu errechnet werden muß.

Durchforstungsanweisungen sind indessen i. d. R. zeitinvariant: Bei einer starken Niederdurchforstung werden dem Normalwaldmodell entsprechend allmählich die Baumklassen 2 bis 5 und ein-

zelne Bäume der Baumklasse 1 entnommen, unabhängig davon, ob der gleichaltrige (Fichten-)Reinbestand 40 Jahre, 60 Jahre oder 80 Jahre alt ist. Eine zeitinvariante Transformation des absoluten BHD ist dessen relative Summenhäufigkeit, die aus der empirischen Verteilungsfunktion abgegriffen werden kann. Neben Zeitinvarianz wird durch diese Normierung gleichzeitig erreicht, daß die Baumdimension BHD relativ zu den übrigen Bäumen des Bestandes eine geeignete bestandesbezogene Quantifizierung erfährt (ein Baum ist nicht nur z. B. „dick“ relativ zu seinem Alter, sondern auch relativ zu seinen Nachbarn oder dem Grundflächenmittelstamm des Bestandes) (Abb. 1). Auch die relative Summenhäufigkeit des BHD braucht nicht eigens für das Durchforstungsmodell des Wachstums-simulators neu berechnet zu werden, denn für die Ausgabe von graphischen Häufigkeitsverteilungen (Säulendiagrammen) oder Leistungstabellen werden diese Informationen ohnehin benötigt und bedeuten demnach keinen zusätzlichen Rechenaufwand.

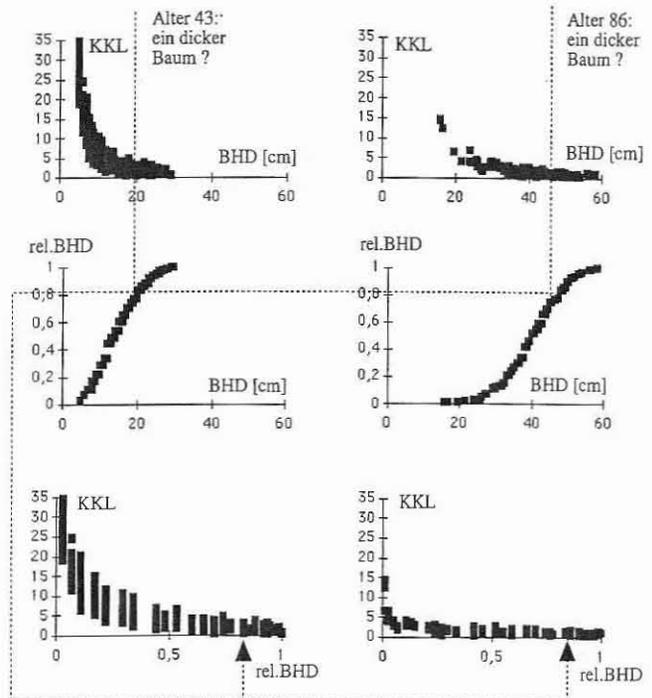


Abb. 1

Zeitinvariante und bestandesbezogene Transformation der Baumdurchmesser durch relative Summenhäufigkeiten (rel. BHD) aus der empirischen Verteilungsfunktion (Daten von Sachsenried 67)

nach Simulation mit dem Wachstumsmodell SILVA

Timeinvariant and stand related transformation of tree diameter by cumulative frequencies (rel. BHD) with data from Sachsenried 67. Simulation with SILVA was necessary to compute the competition indices for all trees

2.1.2. Eingabevariable Konkurrenzdruck

Ein zweites wichtiges Durchforstungskriterium ist die direkte räumliche Strukturierung der Umgebung eines Baumes, der auf seine Durchforstungsdringlichkeit hin klassifiziert werden soll. Als ein Maß zur Charakterisierung dieser nachbarschaftlichen Umgebung wird sein Konkurrenzdruck, numerisch ausgedrückt in einem Konkurrenzindex KKL, gewählt. In diesem Konkurrenzindex wird berücksichtigt, wie weit die Nachbarbäume in den Lichtkegel des betrachteten Baumes hineinragen, wobei zusätzlich eine Gewichtung dieser Lichtkonkurrenz mit den Kronendurchmessern der

Konkurrenzbaume erfolgt. Der Konkurrenzindex KKL ist detailliert bei PRETZSCH (1994) beschrieben, weshalb hier nicht näher auf seine Berechnung eingegangen wird. Für den KKL sind keine weiteren Transformationen wie bei dem BHD zur Erzielung der Zeitinvarianz erforderlich, weil er bereits eine relative Größe ist (vgl. PRETZSCH, 1994). Praktisch wird die Konkurrenzsituation des Baumes wie dessen relativer BHD durch subjektiv verbale Beschreibungsgrößen charakterisiert („der Konkurrenzdruck ist hoch“). Da der KKL eine zentrale Größe bei der Berechnung der Zuwachsreaktionen u. a. von Baumhöhe und -durchmesser ist, werden durch Einbeziehung in das Durchforstungsmodell im Prinzip keine zusätzlichen Rechenoperationen erforderlich, auch brauchen daher keine neuen Algorithmen zur Berechnung des KKL erstellt zu werden.

2.1.3. Ausgabevariable Durchforstungsdringlichkeit

Als einzige Ausgabegröße erzeugt der Fuzzy Logik Controller eine Durchforstungsdringlichkeit jedes Baumes, die in der Regelbasis verbal vorliegt („die Durchforstungsdringlichkeit ist hoch“). Zur Repräsentation der verbalen Ausprägungen dieser Ausgabevariable sowie der beiden in den Regeln ebenfalls vorliegenden Eingabevariablen (relativer BHD, KKL) wird zur mathematischen Repräsentation der Termen („gering“, ..., „mittel“, usw.) auf das aus der Theorie unscharfer Mengen bekannte Konzept der linguistischen Variablen zurückgegriffen, das hier nicht näher erläutert werden soll (vgl. ZIMMERMANN, 1991). In Abbildung 2 sind die linguistischen Variablen Baumstärke (mit der Basisvariablen „relativer BHD“), Konkurrenzdruck (mit der Basisvariablen „KKL“) sowie Durchfor-

stungsdringlichkeit (mit einer auf [0; 1] normierten dimensionslosen Basisvariablen) graphisch dargestellt. In der programmtechnischen Implementierung liegen die Zugehörigkeitsfunktionen der die sprachlichen Ausdrücke repräsentierenden unscharfen Mengen als abschnittsweise definierte lineare Funktion vor.

2.2. Inferenzmechanismen

Bevor ein Design der Regelbasis entworfen wird, soll erläutert werden, wie die Auswertung dieser Regelmenge bei dem Fuzzy Logik Controller erfolgen kann. Es wird angenommen, daß Durchforstungsregeln z. B. für eine starke Niederdurchforstung vorliegen in der Form:

Teilprämisse 1: WENN Baumstärke (rel. BHD) gering
 Teilprämisse 2: UND Konkurrenzdruck (KKL) hoch
 Konklusion: DANN Durchforstungsdringlichkeit des Baumes hoch

2.2.1. Erfüllungsgrad der Prämisse

In einem ersten Schritt wird zunächst die Prämisse ausgewertet. Über den für einen Baum bekannten BHD wird aus der empirischen Verteilungsfunktion dessen relativer BHD abgegriffen. Mit diesem relativen BHD wird der Term „gering“ der linguistischen Variablen Baumstärke ausgewertet. Lautet die Zugehörigkeitsfunktion für diesen Term (vgl. Abb. 2)

$$\mu_{\text{gering}}(\text{rel. BHD}) = \begin{cases} \frac{\text{rel. BHD}}{0,25} & , 0 \leq \text{rel. BHD} \leq 0,25 \\ \frac{0,5 - \text{rel. BHD}}{0,25} & , 0,25 < \text{rel. BHD} \leq 0,50 \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases}$$

so folgt für einen dünnen Baum, der mit einem BHD von 23 cm eine relative Summenhäufigkeit des BHD von 0,1 (d. h. rel. BHD = 0,11) aufweisen mag, der Wert

$$\mu_{\text{gering}}(0,11) = \frac{0,11}{0,25} \iff \mu_{\text{gering}}(0,11) = 0,44.$$

Ebenso ergibt sich für die Teilprämisse 2 ein Wert für $\mu_{\text{hoch}}(\text{KKL})$, der z. B. 0 betragen kann, wenn der KKL des betrachteten Baumes „gering“ ist. Der Erfüllungsgrad der Prämisse wird dann bei gegebenen Realisierungen für rel. BHD und KKL bestimmt als

$$\mu_{\text{Prämisse}} = \min \{ \mu_{\text{Term 1}}(\text{rel. BHD}), \mu_{\text{Term 2}}(\text{KKL}) \},$$

wobei „Term 1“ und „Term 2“ die jeweiligen sprachlichen Terme aus den Teilprämissen 1 und 2 der Regeln sind.

2.2.2. Inferenzen

Es werden nun bei dem Fuzzy Logik Controller 2 Arten der Inferenz unterschieden: Die Max-Min-Inferenz und die Max-Prod-Inferenz, die sich aus der compositional rule of inference unter Verwendung der Mamdani-Implikation ableiten (vgl. z. B. TILLI, 1991; ZIMMERMANN, 1991). Bei der Max-Min-Inferenz ergibt sich die Zugehörigkeitsfunktion des Terms der Konklusion über der hier normierten und dimensionslosen Grundmenge u als

$$\mu_{\text{Konklusion}^*}(u) = \min \{ \mu_{\text{Prämisse}}, \mu_{\text{Konklusion}}(u) \},$$

d. h., die Zugehörigkeitsfunktion des Terms der Konklusion $\mu_{\text{Konklusion}}(u)$, wie sie gemäß der linguistischen Variablen „Durchforstungsdringlichkeit“ sowie der betrachteten Regel gegeben ist, wird über ihrer gesamten Grundmenge u über das Minimum mit dem Erfüllungsgrad der Prämisse verknüpft, woraus sich die Funktion

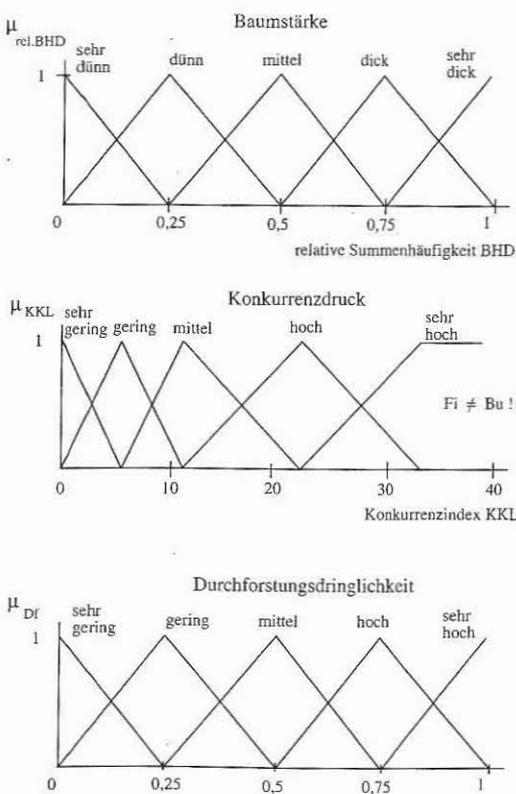


Abb. 2

Die linguistischen Variablen Baumstärke, Konkurrenzdruck und Durchforstungsdringlichkeit. Die Variable Konkurrenzdruck ist für die Baumarten Buche und Fichte unterschiedlich
 The linguistic variables tree thickness, stress from competition and urgency for thinning. The variable stress from competition is different for spruce and beech

$\mu_{\text{Konklusion}^*}(u)$ ergibt (Abb. 3). Bei der Max-Prod-Inferenz (vgl. Abb. 3) ergibt sich $\mu_{\text{Konklusion}^*}(u)$ als

$$\mu_{\text{Konklusion}^*}(u) = \mu_{\text{Prämisse}^*} \cdot \mu_{\text{Konklusion}}(u).$$

Liegen $i = 1 \dots n$ Regeln vor, so führt die Maximumverknüpfung (Max-Min- bzw. Max-Prod-Inferenz) als Vereinigung der realisierten Konklusionen zu der Funktion:

$$\mu_{\text{Regelmenge}}(u) = \bigcup_{i=1}^n \mu_{\text{Konklusion}^*, i}(u).$$

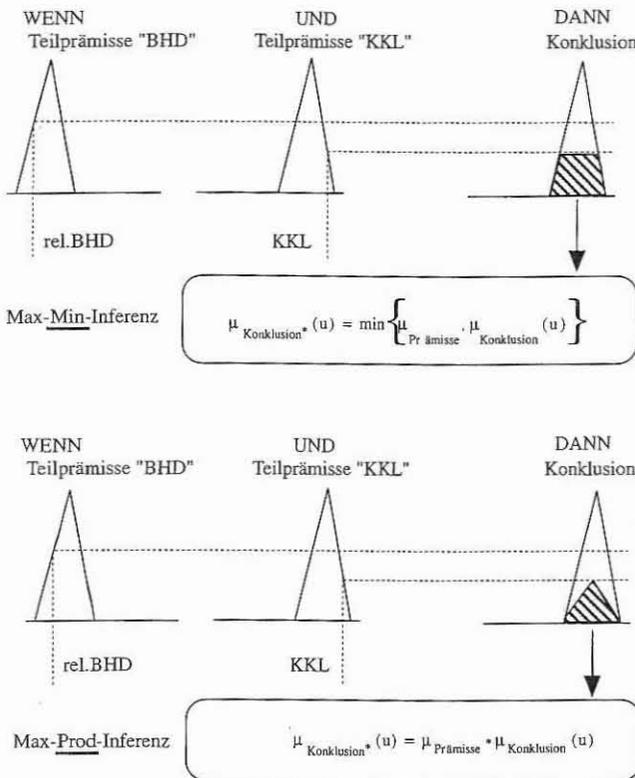


Abb. 3

Max-Min-Inferenz und Max-Prod-Inferenz zur Auswertung der Regeln des Fuzzy Logik Controllers

Max-min-inference and max-prod-inference to evaluate the rules of the fuzzy logic controller

2.2.3. Defuzzifizierung

Die Funktion $\mu_{\text{Regelmenge}}(u)$ wird für jeden Baum, der auf seine Durchforstungsdringlichkeit hin überprüft wird, berechnet. Es handelt sich dann bei $(u, \mu_{\text{Regelmenge}}(u))$ um eine unscharfe Menge, die angibt, wie dringlich die Entnahme des betrachteten Baumes im Rahmen der Durchforstung ist. Um nun diese Dringlichkeiten verschiedener Bäume miteinander vergleichen zu können, oder um z. B. bei einem FLC eine scharfe Ausgabegröße zur Prozeßregelung zu erzeugen, muß diese unscharfe Menge defuzzifiziert werden. Dazu wird das Flächenschwerpunkt-Verfahren gewählt, wobei sich mit dem Flächenschwerpunkt \bar{u} mit

$$\bar{u} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} u \cdot \mu_{\text{Regelmenge}}(u) du}{\int_{-\infty}^{\infty} \mu_{\text{Regelmenge}}(u) du}$$

für die unscharfe Menge Durchforstungsdringlichkeit für jeden Baum eine aus $[0; 1]$ reellwertige Quantifizierung dieser Durchforstungsdringlichkeit ergibt. Werden die Durchforstungsregeln für

alle Bäume eines Bestandes ausgewertet und die jeweiligen Flächenschwerpunkte bestimmt, so kann über letztere eine Reihenfolge aufgestellt werden, aus der die Durchforstungsdringlichkeit aller Bäume ersichtlich wird. Der Baum mit dem größten Flächenschwerpunkt sollte am ehesten entnommen werden.

Zusammenfassend zeigt Abbildung 4 eine schematische Darstellung der Regelmenge für eine starke Niederdurchforstung sowie ein Beispiel für die Max-Prod-Inferenz bei Auswertung der Regelmenge für einen bestimmten Baum.

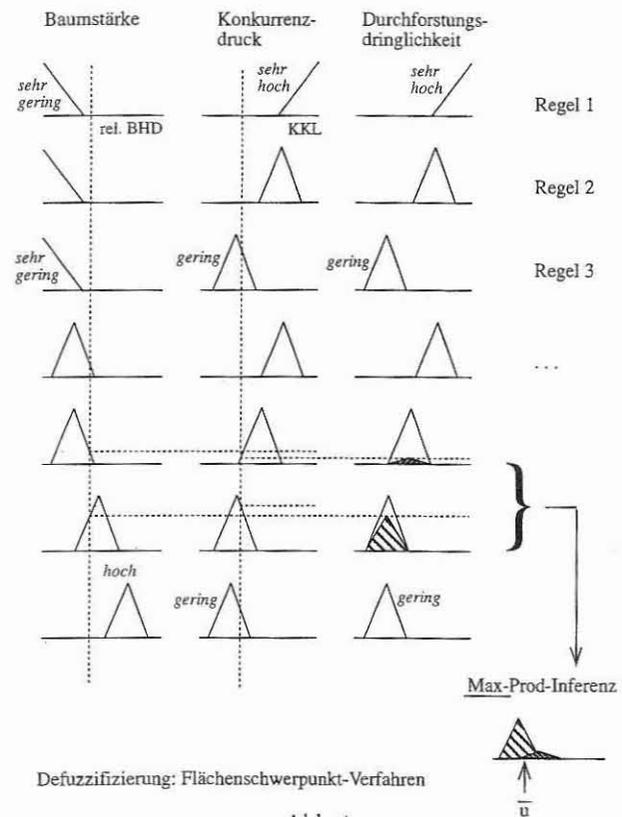


Abb. 4

Schematische Darstellung der Regelmenge für eine starke Niederdurchforstung unter Einbindung der Max-Prod-Inferenz und einer Defuzzifizierung über das Flächenschwerpunktverfahren

Sketch of the rule base for a heavy thinning from below. For evaluation of the rule base the max-prod-inference is applied, and the defuzzification follows the center of gravity method

2.3. Design der Regelbasis

Neben der Festlegung der Zugehörigkeitsfunktionen für die Konstruktion der linguistischen Variablen ist das Design der Regelbasis eine der schwierigsten Aufgaben bei der Entwicklung des FLC.

2.3.1. Durchforstungsanweisungen

Einen ersten Anhaltspunkt für die Aufstellung der Regeln bieten die Durchforstungsanweisungen: Bei einer starken Niederdurchforstung werden nach den Vorschriften des Vereins Forstlicher Versuchsanstalten von 1902 allmählich die Baumklassen 2 bis 5 und einzelne Bäume der Baumklasse 1 entnommen. Die Baumklasse 2 ist aus dem für diese Untersuchung vorliegenden Datenmaterial nicht zu modellieren, weil keine Informationen über die (abnorme) Kronenentwicklung oder Stammform vorliegen. Also soll sich die Klassifizierung darauf beschränken, die Bäume über ihren Durchmesser und ihren Konkurrenzdruck einzuordnen, so daß die Entnahme

z. B. von Bäumen der Klasse 4 (unterdrückt, aber noch lebensfähig) interpretiert wird als die Entnahme solcher Bäume, die „dünn sind und einem hohen Konkurrenzdruck unterliegen“ (Regelprämisse). Mit welcher Schlußfolgerung soll diese Prämisse nun verbunden werden? Wenn unterstellt wird, daß bei einer Niederdurchforstung die Dringlichkeit der Entnahme bei den dünnsten Bäumen mit dem größten Konkurrenzdruck am höchsten und bei den dicken Bäumen mit niedrigem Konkurrenzdruck am geringsten ist, so wäre also die obige Regelprämisse mit der Konklusion „dann ist die Durchforstungsdringlichkeit dieses Baumes hoch“ zu verknüpfen. Setzt man diese Vorgehensweise der Regelbildung auch für die anderen möglichen Kombinationen an Baumdurchmesser, Konkurrenzdruck und Durchforstungsdringlichkeit fort, und beschränkt man sich vielleicht auf die 5 bis 7 wichtigsten Regeln, so erhält man bereits eine erste Vorstellung über das mögliche Aussehen der Regelbasis.

2.3.2. Versuchsflächendaten

Einen 2. Anhaltspunkt bieten die Versuchsflächendaten selbst. Als Beispiel soll der Fichten-Durchforstungsversuch Sachsenried 67, C-Grad, bei einem Bestandesalter von 43 Jahren herangezogen werden. Zunächst müssen die Versuchsflächendaten so aufbereitet werden, daß sie mit einem Einleseformat für den Wachstumssimulator SILVA übereinstimmen. Benötigt werden für diesen Schritt die Baumnummer, der Brusthöhendurchmesser, die Baumhöhe sowie der Kronendurchmesser für jeden Baum, ebenso dessen Ausscheidungskennung. Da keine Baumkoordinaten für diese Bäume vor-

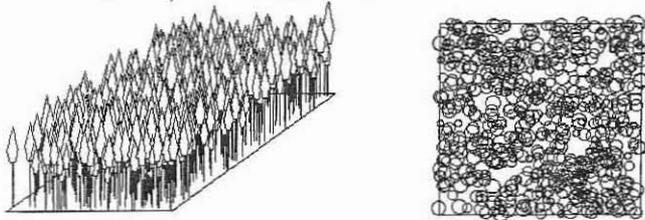
handen sind, wird mit dem Strukturgenerator STRUGEN eine zufällige Verteilung erzeugt (vgl. PRETZSCH, 1993), wobei lediglich baumdurchmesserabhängige Mindestabstände für die Bäume einzuhalten sind. Der Wachstumssimulator wird nun bei der Regelbildung ausschließlich dazu genutzt, für das eingeleseene Baumkollektiv relative Summenhäufigkeiten für den BHD zu berechnen (was auch leicht mit anderen Programmen möglich wäre), vor allem aber, um die baumindividuellen Konkurrenzindizes KKL zu ermitteln. Diese Informationen werden als Liste ausgegeben und daraufhin graphisch aufbereitet. Eine wichtige Darstellung ist dabei die Verteilung der Konkurrenzwerte KKL über den relativen Summenhäufigkeiten des BHD (Abb. 5). Denn überträgt man nun die Zugehörigkeitsfunktionen der sprachlichen Ausdrücke von den linguistischen Variablen (vgl. Abb. 2) an die Achsen dieser Darstellung von Abbildung 5, so ist leicht zu erkennen, daß nicht jede Regel, d. h. nicht jede Kombination von KKL und relativem BHD auch Sinn macht. Eine Regel mit einer Prämisse wie „wenn der relative BHD hoch ist und der Konkurrenzdruck ist hoch“ ist bei beliebiger Konklusion völlig überflüssig, weil es solche Bäume in diesem Kollektiv nicht gibt. Hieraus lassen sich also die aus den Durchforstungsvorschriften abgeleiteten „Protoregeln“ direkt am Datenmaterial präzisieren.

2.3.3. Simulation

Mit einer jetzt aufgrund von Durchforstungsvorschriften und Datenstrukturen vorliegenden vorläufigen Regelmenge ist es nach Implementierung des bisher noch nicht im Detail vorgestellten Durchforstungsmodells möglich, erste Simulationsläufe zu starten. Das Einleseformat für den Wachstumssimulator bleibt unverändert. Als Ausgabe wird vom Simulator dann ein graphischer Vergleich erstellt, aus dem ersichtlich wird, wie sich die wirklichen von den simulierten Verteilungen der Baumzahlen über den absoluten Durchmessern voneinander unterscheiden. In Abbildung 6 ist ein solcher Vergleich zu sehen, der die Eingriffe auf der Versuchsfläche Sachsenried 67, C-Grad, in den Altern 43 und 86 den Prognosen gegenüberstellt. Bereits nach wenigen Simulationen war es möglich, das Prognoseverhalten des Durchforstungsmodells aufgrund gezielter Änderungen der Regelmenge relativ gut einzuschätzen. Die Prognosen gemäß Abbildung 6 sind das Resultat nach mehreren Simulationsläufen, nach denen jeweils sinnvolle Änderungen an der Regelmenge durchgeführt wurden.

Versuchsfläche Sachsenried 67, C-Grad, Alter 43

Generierung der Baumverteilung mit STRUGEN



Visualisierung einer Regelprämisse

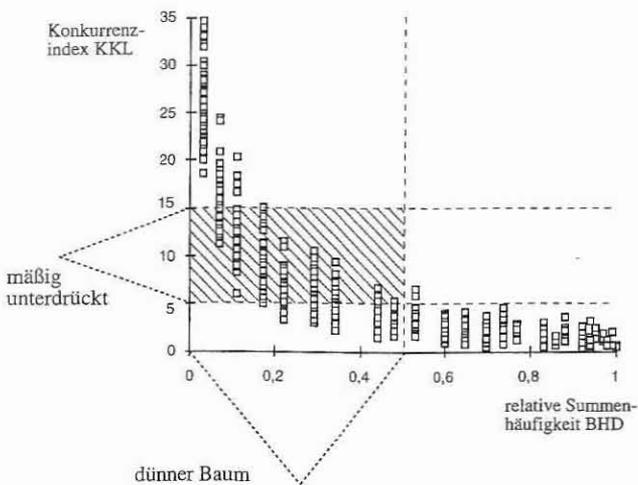


Abb. 5

Nutzung von Versuchsflächendaten zur Erzeugung von Durchforstungsregeln für den Fuzzy Logik Controller. Die Baumverteilung wurde mit STRUGEN (PRETZSCH, 1993) generiert

Using data from experimental plots to design the rule base for the fuzzy logic controller. The horizontal tree distribution has been generated with STRUGEN (PRETZSCH, 1993)

3. DURCHFÖRSTUNGSMODELL

3.1. Durchforstungsalgorithmus

Der Fuzzy Logik Controller ist nun in einen Algorithmus einzubinden, der als Durchforstungsmodell dem Wachstumssimulator implementiert werden kann. Dieser Algorithmus beginnt mit dem Festlegen von Durchforstungsart und Durchforstungsstärke (Abb. 7). Mit dem jetzigen Modell sind zunächst Regelmengen für eine starke Niederdurchforstung bei Fichte sowie eine grundflächengesteuerte Hochdurchforstung bei Buche verfügbar. In einem 2. Schritt greift der Algorithmus auf eine Programmroutine zur Bestimmung der relativen Summenhäufigkeiten aus der empirischen Verteilungsfunktion der BHD zurück, so daß für alle Bäume des zu simulierenden Bestandes die relativen BHD vorliegen. Auch die Konkurrenzindizes KKL werden für alle Bäume bestimmt. Mit den relativen BHD und den KKL können die Regelmengen mit der Max-Min- oder der Max-Prod-Inferenz ausgewertet werden, wobei der Max-Prod-Inferenz der Vorzug gegeben wird (vgl. ROMMELFANGER, 1993). Anschließend werden die als unscharfe Mengen vorliegenden Durchforstungsdringlichkeiten defuzzifiziert, indem das Flächenschwerpunktverfahren angewendet wird. Mit einem schnellen Suchalgorithmus (QUICKSORT) werden die Bäume dann nach diesen Flächenschwerpunkten absteigend sortiert. Falls die Durchforstung noch nicht beendet werden soll, z. B. weil keine Bäume mit Flächenschwerpunkten echt größer Null bestimmt wurden oder

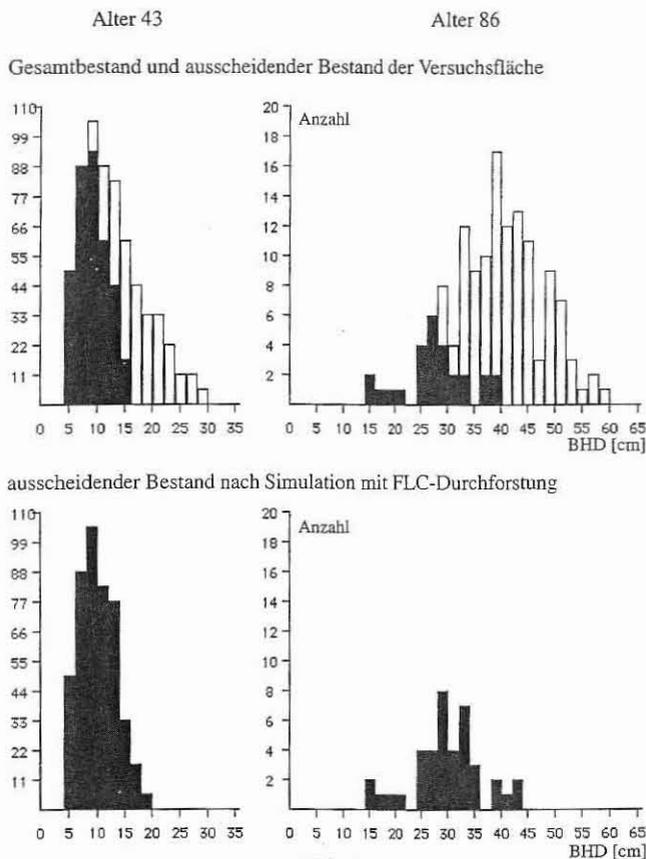


Abb. 6

Simulationsgestützte Entwicklung von Durchforstungsregeln am Beispiel der Versuchsfläche Sachsenried 67, C-Grad. Die Prognoseresultate beeinflussen die Ausgestaltung der Regelbasis. Die Simulationen wurden mit dem Wachstumssimulator SILVA (PRETZSCH, 1992) durchgeführt. Simulation aided design of the fuzzy logic controller with data from the experimental plot Sachsenried 67. The results from the simulation with SILVA (PRETZSCH, 1992) take influence on the design of the rule base

weil die zu entnehmende Grundfläche oder Baumzahl bereits erreicht ist, wird der Baum mit dem größten Flächenschwerpunkt entnommen.

Durch die Entnahme dieses Baumes kann es vorkommen, daß sich für einen oder mehrere Bäume die Durchforstungsdringlichkeit ändert, etwa weil ein Konkurrent weggefallen ist: Der Konkurrenzdruck ist kleiner geworden, die Durchforstungsdringlichkeit kann sinken. Aus einem heuristischen Prinzip heraus werden nun für die 9 verbleibenden Bäume mit dem größten Flächenschwerpunkt die Konkurrenzwerte KKL neu berechnet, ebenso werden die Regelmengen für diese Bäume neu ausgewertet und aktuelle Flächenschwerpunkte bestimmt. Falls sich für einen oder mehrere dieser Bäume der Flächenschwerpunkt dadurch ändert, wird die nach Flächenschwerpunkten sortierte Liste aller Bäume entsprechend aktualisiert.

Dieses Verfahren der Neuberechnung der KKL bis hin zur Neubestimmung der Flächenschwerpunkte und Baumentnahme wiederholt sich solange, bis die Durchforstung aus den bereits genannten Gründen beendet werden kann.

Das heuristische Prinzip der Berücksichtigung der jeweils 9 durchforstungsdringlichsten Bäume bei der Neukalkulation der Regelwerte beruht auf der Annahme, daß ein nicht durchforstungsdringlicher Baum durch die Entnahme eines Konkurrenten nicht

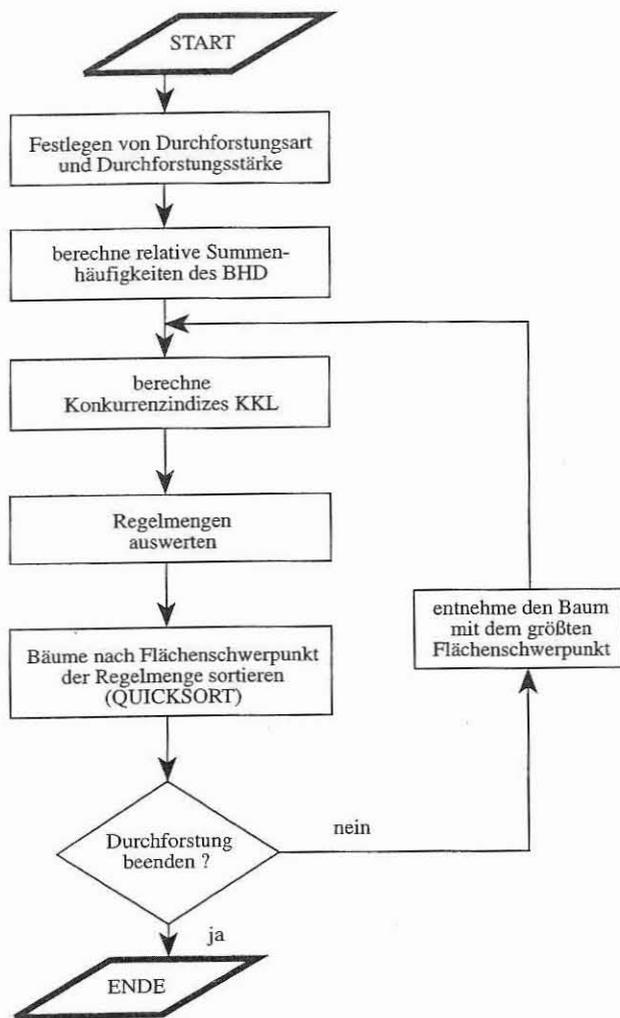


Abb. 7

Flußdiagramm zum Durchforstungsalgorithmus
Flow chart for the thinning algorithm

durchforstungsdringlicher wird, eher im Gegenteil. Im Prinzip würde es auch genügen, nur für den Baum die Regelmenge neu zu kalkulieren, der dem gerade entnommenen Baum in der Flächenschwerpunktliste folgt. Falls sich dessen Regelwert nicht ändert, kann er auch entnommen werden, anderenfalls ist er in der Liste zurückzustufen. Die Beschränkung auf nur 9 Bäume gründet sich zusätzlich darauf, daß in Bezug auf das untersuchte Datenmaterial die durchschnittliche Zahl der Konkurrenten eines Baumes zwischen 7 und 12 lag.

3.2. Modellvalidierung und Simulation

Die simulationsgestützte Modellvalidierung erfolgt anhand des C-Grades der Fichten-Durchforstungsversuchsfläche Denklingen 05. Simuliert werden die Entnahmen bei einer starken Niederdurchforstung in den Bestandesaltern 35, 55 und 104. Die prognostizierten Entnahmen werden den wirklichen Entnahmen in Form von Baumzahl-Durchmesserverteilungen gegenübergestellt. Die graphischen Darstellungen, wie sie in Abbildung 8 gezeigt werden, sind direkte Ausgaben des Wachstumssimulators SILVA. Es ist dabei zu erkennen, daß die Prognosen gut mit den wirklichen Entnahmen übereinstimmen. Der auf normativen Durchforstungsvorschriften sowie empirischem Datenmaterial aufgebaute Fuzzy Logik Controller als Kernmodul des Durchforstungsalgorithmus ist also in der Lage, starke Niederdurchforstungen wirklichkeitsnah nachzubilden.

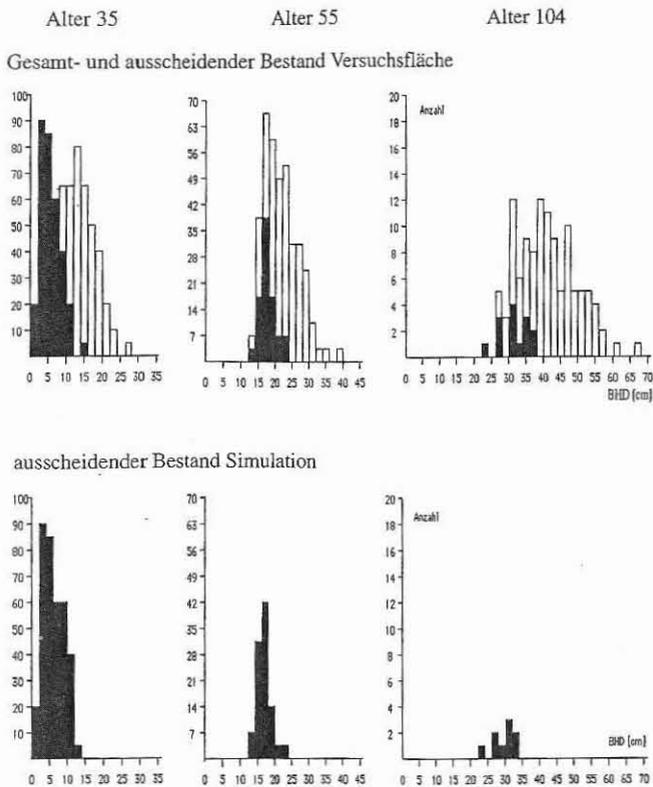


Abb. 8

Simulationsgestützte Modellvalidierung am Beispiel der Fichten-Versuchsfläche Denklingen 05, C-Grad.

Die Simulationen wurden mit dem Wachstumssimulator SILVA (PRETZSCH, 1992) durchgeführt

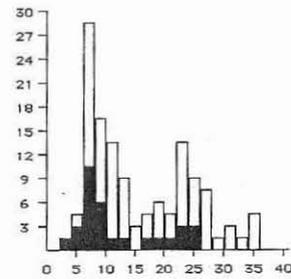
Validating the thinning model with data from the experimental plot Denklingen 05, spruce, at different ages. The simulations have been performed with the single tree simulator SILVA (PRETZSCH, 1992)

In einem 2. Schritt der Validierung des Modellansatzes wurde versucht, auch hochdurchforstungsartige Eingriffe mit dem Fuzzy Logik Controller zu simulieren. Dazu wurden die Daten einer E-Grad-Parzelle des Buchen-Durchforstungsversuches Starnberg 91 bei einem Bestandesalter von 66 Jahren herangezogen. Die Entwicklung der Regelmenge erfolgte wie unter Abschnitt 2.3 beschrieben. Werden nun alle Bäume entnommen, deren Flächenschwerpunkt bei der Auswertung der Regeln echt größer als Null ist, so ist die Entnahme im Vergleich zu der als mäßige Hochdurchforstung geführten Versuchsfläche Starnberg 91 doch etwas zu stark (Abb. 9). Deutlich ist allerdings die 2gipfelige Verteilung der Baumzahlen über den BHD zu erkennen, die für Hochdurchforstungen typisch ist. Wird jedoch bei der Simulation der Durchforstung der gleiche Anteil an der Bestandesgrundfläche entnommen wie in der Wirklichkeit, so ist die annähernde Übereinstimmung mit der tatsächlichen Baumentnahme unverkennbar. Da sich die Grundflächenentnahme auf der Versuchsfläche direkt an die Bestandesgrundfläche des A-Grades anlehnt, hätte demnach die Kopplung der zu entnehmenden Grundfläche an den A-Grad im Rahmen der Simulation unmittelbar zu denselben Ergebnissen geführt.

3.3. Weiterentwicklung des Modellansatzes

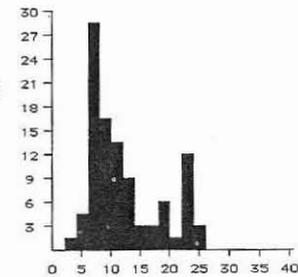
Der Einbau des Fuzzy Logik Controllers zur Steuerung von Durchforstungseingriffen erscheint als eine geeignete Alternative etwa zu Verteilungsansätzen, deren inhaltliche Interpretierbarkeit im Zusammenhang z. B. mit definitorisch festgelegten Durchfor-

Gesamtbestand und ausscheidender Bestand auf der Versuchsfläche



Simulation:
ausscheidender Bestand
Durchforstungsstärke:

$$\bar{u} > 0$$



Simulation:
ausscheidender Bestand
Durchforstungsstärke:
Entnahme von 17% der Grundfläche wie auf der Versuchsfläche

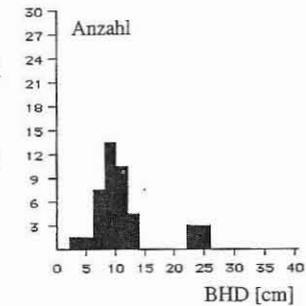


Abb. 9

Beispiel für die Prognoseresultate des FLC-Modells einer mäßigen Hochdurchforstung, Starnberg 91, Buche, Alter 66

Example for the results of a prognosis with the fuzzy logic controller modelling a moderate crown thinning (data from the experimental plot Starnberg 91, beech, age 66)

stungsvorschriften nur sehr unzureichend ist. Auch ist die Treffgenauigkeit des FLC-Modells bei der Nachbildung wirklicher Durchforstungseingriffe durchaus zufriedenstellend und die Implementierung in eine den Wachstumssimulator SILVA ergänzende Programmroutine leicht durchführbar.

Mit Hilfe der Regelbasis erscheint es möglich, auch sehr ungenau formulierte Entscheidungsvorschriften (einschließlich z. B. einer „freien“ Durchforstung) flexibel in ein rechnergestütztes Durchforstungsprogramm einzubinden. Diese Einbindung durch erweiterte Regelmengen soll ein Schwerpunkt der Weiterentwicklung des Durchforstungsmodells sein, so daß auch Zielstärkennutzungen oder baumabstandsorientierte Durchforstungsverfahren bei der Wachstumssimulation simuliert werden können, ebenso wie die Durchforstung im Mischbestand.

Ein weiterer Schwerpunkt ist natürlich die weitere Validierung des bisherigen Modellansatzes, so daß vor allem die häufigsten Durchforstungsarten wie Hoch- und Niederdurchforstung treffgenau modellierbar sind. Dazu gehört auch die Berücksichtigung verschiedener Kriterien zur Einbeziehung der Durchforstungsstärke, die z. B. grundflächen-, baumzahl- oder abstandsgesteuert verlaufen kann.

Als weiteres Entwicklungsziel ist die Optimierung von Durchforstungseingriffen zu nennen. Diese Optimierung kann unter den un-

terschiedlichsten Kriterien erfolgen, z. B. einer Maximierung des laufenden Grundflächenzuwachses oder einer Maximierung der Diversität. Ob dabei tatsächlich die Suche nach optimalen Lösungen überhaupt sinnvoll ist, oder ob Heuristiken bei der Suche nach möglichst guten Lösungen eher geeignet sind, ist a priori nur schwer zu beantworten.

4. ZUSAMMENFASSUNG

Die Modellierung von Durchforstungseingriffen ist ein wichtiger Teilkomplex bei der Entwicklung von Waldwachstumssimulatoren, die sowohl für forstpraktische Zwecke als auch in der forstwissenschaftlichen und waldwachstumskundlichen Forschung Anwendung finden sollen. Als Zusatzmodul für einen baumpositionsabhängigen Wachstumssimulator wird ein Durchforstungsmodell konzipiert, dessen zentrales Prinzip ein Fuzzy Logik Controller ist. Kernelement dieses Fuzzy Logik Controllers ist eine einfache Regelmenge, mit der sowohl normative Durchforstungsvorschriften als auch menschliches Entscheidungsverhalten flexibel und gut interpretierbar nachgebildet werden können.

Der Durchforstungsalgorithmus und insbesondere der Fuzzy Logik Controller werden auf einer empirischen Datengrundlage entwickelt sowie an unabhängigem Datenmaterial validiert. Die Simulationsresultate zeigen, daß sowohl starke Niederdurchforstungen als auch Hochdurchforstungen im Vergleich mit der Wirklichkeit treffgenau und rechentechnisch effizient nachgebildet werden können.

5. Summary

Title of the paper: *Modelling thinning regimes with a fuzzy logic controller.*

A very important issue in the development of a tree growth simulator is the implementation of a thinning model. This model should be suitable to represent formally defined thinning regimes as well as human decision making, which seems to be very ill structured in the context of thinning practice. In addition the model should be capable of giving a quite exact prognosis of real thinning regimes which have been documented on long term observation experimental plots.

For this reason a thinning model is designed that can be implemented into distance dependent single tree growth simulators. The most central modul of this thinning model is a fuzzy logic controller which consists of a merely simple rule base with no more than seven rules. The only input variables are a relative tree diameter and a distance dependent competition index, the output variable prepares the thinning decision of a single tree. The rule base is designed using formally defined thinning instructions, empirical data from experimental plots and simulation results. The evaluation of the rule base is maintained by applying the max-prod-inference, the defuzzification of the resulting thinning decision follows the center of gravity method.

The thinning model is validated using independent data from experimental plots. The simulation results give evidence of the good estimations that can be achieved using the model to predict the diameter distribution of the thinned trees in comparison with thinning

practice on experimental plots. The fuzzy logic controller shows its computational efficiency and promises flexibility to serve as a mechanism which is suitable to model imprecise human decision making in ill structured situations as can be observed in thinning practice.

6. Résumé

Titre de l'article: *La logique de Fuzzy (Fuzzy Logic), base de la modélisation des éclaircies.*

La modélisation des éclaircies constitue un complexe partiel mais important pour le développement des simulations de la croissance de la forêt qui doivent trouver leur utilisation aussi bien pour les objectifs de la pratique forestière que pour les recherches dans le domaine des sciences forestières et de la croissance des forêts. Comme module complémentaire pour une simulation de la croissance dépendant de la position des arbres, on a conçu un modèle d'éclaircie dont le principe central est un contrôle suivant la logique de Fuzzy (Fuzzy Logic). L'élément capital de ce contrôle suivant la logique de Fuzzy (Fuzzy Logic) est un ensemble simple de règles suivant lesquelles peuvent être retracées aussi bien les méthodes d'éclaircies normatives que la manière dont l'homme prend ses décisions, et cela de façon telle qu'on dispose d'une grande flexibilité et d'une bonne faculté d'interprétation.

L'algorithme de l'éclaircie et plus particulièrement le contrôle suivant la logique de Fuzzy (Fuzzy Logic) ont été développés sur une base empirique de données et validés à partir d'un autre ensemble de données indépendant. Les résultats de la simulation sont en bonne concordance avec la réalité, qu'il s'agisse d'éclaircies fortes par le bas ou d'éclaircies par le haut et celles-ci peuvent être décrites efficacement par les techniques de calcul.

J. M.

7. Literatur

- ABETZ, P.: Eine Entscheidungshilfe für die Durchforstung von Fichtenbeständen. Allgemeine Forstzeitschrift 30, 666–667, 1975
- ASSMANN, E.: Waldertragskunde. BLV Verlag, 1961
- GADOW, K. VON: Untersuchungen zur Konstruktion von Wuchsmodellen für schnellwüchsige Plantagenbaumarten. Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 77, 1987
- KAHN, M.: Modellierung der Höhenentwicklung ausgewählter Baumarten in Abhängigkeit vom Standort. Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 141, 1994
- MICHAELIS, K. A.: Gute Bestandespflege mit Starkholzzucht, eine der wichtigsten Aufgaben unsere Zeit. Neudamm, 1907
- PRETZSCH, H.: Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 151, 1992
- PRETZSCH, H.: Analyse und Reproduktion räumlicher Bestandesstrukturen, Versuche mit dem Strukturgenerator STRUGEN. Schriften aus der Forstlichen Fakultät der Universität Göttingen und der Niedersächsischen Forstlichen Versuchsanstalt, Nr. 114. J. D. Sauerländer's Verlag, 1993
- PRETZSCH, H.: Zur Wirkung richtungsabhängiger räumlicher Konkurrenz auf den Baumzuwachs in strukturreichen Beständen. Vortrag auf der 7. Tagung der Sektion Forstliche Biometrie und Informatik, Ljubljana, Grosuplje 20. 9. 1994 bis 24. 9. 1994. 1994
- ROMMELFANGER, H.: Fuzzy-Logik basierte Verarbeitung von Expertenregeln. OR-Spektrum 15, 31–42, 1993
- TILLI, T.: Fuzzy-Logik. Franzis-Verlag, 1991
- ZIMMERMANN, H.-J.: Fuzzy set theory and its applications. Kluwer Academic Publishers. 2. Auflage, 1991