

ALLGEMEINE FORST UND JAGDZEITUNG

Sonderdruck

ISSN 0002-5852

INHALTSVERZEICHNIS

AUFSÄTZE

M. Kahn	Optimierung eines hochparametrisierten Fuzzy Regelsystems mit evolutionären Algorithmen	205
	(Optimizing a high parameterized fuzzy system with evolutionary algorithms)	
H. Pretzsch	Strukturvielfalt als Ergebnis waldbaulichen Handelns	213
	(Structural diversity as a result of silvicultural treatment)	

BUCHBESPRECHUNGEN 222

NOTIZ 224

167. JAHRGANG 1996 HEFT 11 NOVEMBER

J.B. SAUERLÄNDER'S VERLAG FRANKFURT AM MAIN

ALLGEMEINE FORST UND JAGDZEITUNG

Unter Mitwirkung der
Mitglieder der Lehrkörper der Forstlichen Fakultäten
von Freiburg i. Br. und Göttingen

herausgegeben von

Dr. H. Steinlin
o. Professor
der Forstwissenschaft an der
Universität Freiburg i. Br.

Dr. H. Kramer
o. Professor
der Forstwissenschaft an der
Universität Göttingen

ISSN 0002-5852

Erscheinungsweise: Jährlich 12 Hefte, bei Bedarf Doppelhefte (zweimonatlich).

Bezugspreis: Jährlich DM 258,— zuzüglich Zustellgebühr; Studenten und in Ausbildung befindliche Forstreferendare DM 206,40 (empf. Richtpreis). Preis der Einzelhefte je nach Umfang verschieden.

Bezug: Durch den Buchhandel oder direkt vom Verlag. Das Abonnement gilt jeweils für einen Jahrgang. Es läuft weiter, wenn nicht unmittelbar nach Lieferung des Schlußheftes eines Jahrgangs eine Abbestellung erfolgt.

Manuskripte (es werden nur Erstarbeiten veröffentlicht) sind nach vorheriger Anfrage an die Herausgeber einzusenden. Für unverlangt eingegangene Manuskripte wird keine Gewähr übernommen. Rücksendung erfolgt nur, wenn Rückporto beiliegt.

Manuskripte mit Tabellen oder Abbildungen werden nur angenommen, wenn die Tabellen-Überschriften und die Abbildungs-Unterschriften neben deutscher auch in englischer Sprache abgefaßt sind.

Der Autor hat in der Regel auch die Zusammenfassung in englischer Sprache mitzuliefern. Die Übersetzung ins Französische kann dagegen durch den Verlag erfolgen.

Interessierte Autoren bitten wir, die Hinweise zu beachten, die beim Verlag oder den Herausgebern zu erhalten sind.

Die in dieser Zeitschrift veröffentlichten Beiträge sind urheberrechtlich geschützt. Übersetzung, Nachdruck – auch von Abbildungen –, Vervielfältigung auf photomechanischem oder ähnlichem Wege Teilen von ihnen einzelne Vervielfältigungsstücke im Rahmen des § 54 UrhG hergestellt und dienen diese gewerblichen Zwecken, ist dafür eine Vergütung gem. den gleichlautenden Gesamtverträ-

gen zwischen der Verwertungsgesellschaft Wissenschaft GmbH, 60311 Frankfurt/Main, Großer Hirschgraben 17–21, und dem Bundesverband der Deutschen Industrie e. V., dem Gesamtverband der Versicherungswirtschaft e. V., dem Bundesverband deutscher Banken e. V., dem Deutschen Sparkassen- und Giroverband und dem Verband der Privaten Bausparkassen e. V., in die VG Wissenschaft zu entrichten. Die Vervielfältigungen sind mit einem Vermerk über die Quelle und den Vervielfältiger zu versehen. Erfolgt die Entrichtung der Gebühren durch Wertmarken der VG Wissenschaft, so ist für jedes vervielfältigte Blatt eine Marke im Wert von DM 0,40 zu verwenden.

Anzeigenannahme: J. D. Sauerländer's Verlag, Finkenhofstraße 21, 60322 Frankfurt am Main.

Anzeigenpreis: Die 43 mm breite mm-Zeile DM 0,87. Für Geschäftsanzeigen gilt die Preisliste Nr. 8. Anfragen an Verlag erbeten.

Verlag: J. D. Sauerländer's Verlag, Finkenhofstraße 21, 60322 Frankfurt am Main, Fernruf (069) 55 52 17, Telefax (069) 5 96 43 44. Bankkonten: Commerzbank, Frankfurt a. M. 5 408 075; Frankfurter Sparkasse (Girokonto 96 958); Postgirokonto: Frankfurt a. M. Nr. 896-607.

This journal is covered by Biosciences Information Service of Biological Abstracts, by Chemical Abstracts, by Current Contents Series Agriculture, Biology and Environmental Sciences (CC/AB) and by the Science Citation Index® (SCI®) of Institute for Scientific Information.

Die Anschriften der Mitarbeiter von Heft 11 des 167. Jahrgangs sind:

Dr. M. KAHN, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Universität München, Forstwissenschaftliche Fakultät, Hohenbachernstraße 22, D-85354 Freising

Prof. Dr. H. PRETZSCH, Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der Universität München, Forstwissenschaftliche Fakultät, Hohenbachernstraße 22, D-85354 Freising

Prof. Dr. H. SPIECKER, Institut für Waldwachstum der Universität Freiburg, Bertoldstraße 17, D-79085 Freiburg

Die Buchbesprechungen erfolgten von:

Dipl.-Forsting. (PL) S. BOROWSKI, Institut für Forstpolitik und Raumordnung, Arbeitsbereich Holzmarktlehre, Bertoldstraße 17, D-79085 Freiburg

Prof. Dr. H.-P. EBERT, Fachhochschule für Forstwirtschaft, Schadenweilertshof, D-72108 Rottenburg

Dr. U. E. SCHMIDT, Institut für Forstpolitik, Arbeitsbereich Forstgeschichte, Universität Freiburg, D-79085 Freiburg

Prof. em. Dr. Dr. h. c. M. SCHMIDT-VOGT, Schloßweg 27 a, D-79249 Merzhausen

Prof. Dr. H. STEINLIN, Eichhalde 68, D-79104 Freiburg

Übersetzung der Résumés, soweit sie nicht von den Autoren zur Verfügung gestellt werden:

J. MAHEUT, 25 Av. du Gal Leclerc, F-54600 Villers-les-Nancy

Optimierung eines hochparametrisierten Fuzzy Regelsystems mit evolutionären Algorithmen¹⁾

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

(Mit 6 Abbildungen und 1 Tabelle)

Von M. KAHN

(Angenommen Januar 1996)

SCHLAGWÖRTER – KEY WORDS

Durchforstungsmodell; Fuzzy Logik Regeln; empirische Optimierung; Evolutionäre Strategien.

Thinning model; fuzzy logic rules; empirical optimization; evolutionary strategies.

1. EINLEITUNG

1.1. Forstlicher und modellbezogener Hintergrund

Die Modellierung von Durchforstungseingriffen ist ein wichtiger Teilkomplex bei der Entwicklung von Waldwachstumssimulatoren, die sowohl für forstpraktische Zwecke als auch in der forstwissenschaftlichen und waldwachstumkundlichen Forschung Anwendung finden sollen. Als Zusatzmodul für den baumpositionsabhängigen Einzelbaum-Wachstumssimulator SILVA von PRETZSCH (1992) wurde daher ein Durchforstungsmodell konzipiert, dessen zentrales Prinzip ein Fuzzy Logik basiertes Regelsystem ist (KAHN, 1995). Kernelement dieses Fuzzy Logik basierten Modells ist eine Regelmenge, mit der sowohl normative Durchforstungsvorschriften als auch menschliches Entscheidungsverhalten flexibel und gut interpretierbar nachgebildet werden können. Anwendungsbezogene Simulationsresultate zeigen, daß mit dem Modellansatz sowohl Niederdurchforstungen und Hochdurchforstungen in Reinbeständen als auch kompliziert strukturierte Durchforstungsanweisungen für Mischbestände rechnerisch darstellbar sind.

1.2. Methodische Fragestellung

Bisher war es ein noch weitgehend ungelöstes Problem, wie das Design eines solchen Regelsystems objektiviert und optimiert werden kann, sofern keine normative Vorgehensweise gewählt wird. Dieses Problem hat mehrere Ursachen: Erstens sind die Parameter-räume komplexer nichtlinearer Fuzzy-Systeme i. a. hochdimensional. Denn zur mathematischen Beschreibung verbal subjektiv kodierter Zusammenhänge müssen die Zugehörigkeitsfunktionen linguistischer Variablen parametrisiert werden, wozu etwa abschnittsweise definierte 3-parametrische trianguläre bzw. 4-parametrische trapezoidale Funktionen verwendet werden können. Zweitens erschwert neben den hohen Parameterzahlen zusätzlich die Auswahl der besten Regeln eine Optimierung von Fuzzy Systemen. So können die Regelmengen der Fuzzy Logik basierten Durchforstungsalgorithmen aus einigen wenigen Regeln zur Nachbildung von Niederdurchforstungseingriffen in Reinbeständen bestehen. Andererseits können zur Aufstellung einer Regelbasis für Durchforstungseingriffe in reich strukturierten Mischbeständen mehrere 100 Regeln formuliert werden. Es ist nicht trivial, zu entscheiden, welche der theoretisch möglichen Regeln in der Regelbasis aufgenommen werden sollen.

Zur Lösung beider Probleme, sowohl zur Parametrisierung von Zugehörigkeitsfunktionen als auch zum Design der Regelbasis, wird ein Verfahrenskomplex unter Verwendung evolutionärer Strategien vorgestellt.

2. DURCHFÖRSTUNGSTRAINING ZUR BESCHAFFUNG VON LERNDATEN

Um eine empirische Vorgehensweise zur Entwicklung des methodischen Rüstzeuges für die Parametrisierung des Fuzzy Systems zu ermöglichen, werden Daten benötigt. Zur Beschaffung von Lerndaten wird auf den Wachstumssimulator SILVA zurückgegriffen. Damit soll zugleich eine Durchforstungs-Schnittstelle zur interaktiven Kommunikation zwischen Simulator und Anwender geschaffen werden. Folgende Vorgehensweise zur Erzeugung der Daten wird gewählt:

(1.) Beispielhaft wird als Durchforstungsart eine Hochdurchforstung in Buchenreinbeständen bestimmt.

(2.) Um im Hinblick auf die Datenstruktur ein breites Spektrum zu schaffen und für die anzuwendenden statistischen Verfahren für genügend Stimulanz zu sorgen, werden mit dem Strukturgenerator STRUGEN (PRETZSCH, 1993) stark unterschiedliche Bestandesstrukturen erzeugt. Diese unterschiedlichen Strukturen sind hier gegeben über sehr dicht bis sehr locker stehende Jung- sowie Altbestände (Abb. 1).

(3.) Für jeden Baum dieser Bestände wird dann über die Grafikschnittstellen des Wachstumssimulators eine vergrößerte Darstellung seiner räumlichen Wuchskonstellation gezeichnet. Zugleich wird am Bildschirm eine Liste der individuellen Baumparameter gezeigt.

(4.) Durch graphische und numerische Information kann sich der Benutzer einen Eindruck von der Konkurrenzsituation des Baumes machen, der dann unter dem gegebenen Trainingskonzept (Hochdurchforstung) auf seine Durchforstungsdringlichkeit beurteilt wird (Abb. 1). Diese Beurteilung wird einschließlich der Baumparameter in einer Datei abgelegt.

3. FUZZY REGELSYSTEME

3.1. Aufbau von Fuzzy Regelsystemen

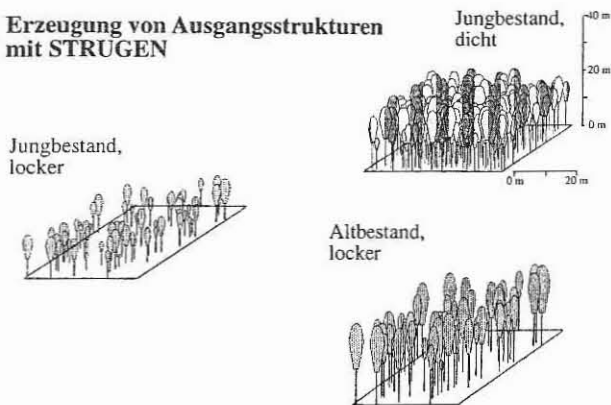
Fuzzy Regelsysteme bestehen aus einer Menge von Regeln. Jede Regel hat eine Prämisse sowie eine Konklusion. Die Prämissen können in mehrere Teilprämissen zergliedert sein. Es handelt sich um WENN-DANN-Beziehungen. Es wird ein Fuzzy Regelsystem mit 2 Eingabevariablen, d. h. 2 Teilprämissen, und einer Ausgabevariablen zugrunde gelegt. Von einem methodischen Standpunkt aus sind beliebig viele Teilprämissen möglich. Eine einzelne Regel könnte für eine Hochdurchforstung beispielhaft lauten:

Teilprämisse 1	WENN	die Baumstärke (<i>gering</i>) ist
Teilprämisse 2	UND	die Konkurrenz des Baumes (<i>gering</i>) ist
Konklusion	DANN	ist seine Durchforstungsdringlichkeit (<i>gering</i>).

Die Eingabevariablen sind Baumstärke und Konkurrenzdruck, die Ausgabevariable ist die Durchforstungsdringlichkeit. Diese Variablen können als linguistische Variablen dargestellt werden und beispielhaft die Termmengen sehr gering, gering, mittel, hoch, sehr hoch umfassen. Der Definitionsbereich dieser linguistischen Variablen wird über die sogenannte Basisvariable festgelegt. Für die linguistische Variable Baumstärke wird die relative Summenhäufigkeit der Baumdurchmesser eines Bestandes als Basisvariable gewählt

¹⁾ Textfassung eines Vortrages auf der 8. Tagung der Sektion Forstliche Biometrie und Informatik im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten, Tharandt/Grillenburg 25. 9. 1995 bis 28. 9. 1995.

Erzeugung von Ausgangsstrukturen mit STRUGEN



Beurteilung der Durchforstungsdringlichkeit Trainingskonzept: Hochdurchforstung



Durchforstungsdringlichkeit
Abb. 1

Erzeugung von Trainingsdaten für eine empirische Parameterisierung des regelbasierten Durchforstungsmodells. Oben: Erzeugung unterschiedlicher Ausgangsstrukturen mit STRUGEN. Die Beispielbestände sind im gleichen Maßstab dargestellt. Unten: Ausschnitte aus Beispielbeständen zur Beurteilung der Durchforstungsdringlichkeit ausgewählter Einzelbäume bei Hochdurchforstung. Flächengröße 12 m × 12 m
Generating training data for an empirical parameterization of the rule based thinning model. Top: Generating different stand structures using STRUGEN. All sample plots have the same scaling. Bottom: Evaluation the urgency for thinning of selected trees in means of a crown thinning. Patch size 12 m × 12 m

(Abb. 2), die im folgenden abkürzend auch als 'relativer BHD' bezeichnet wird. Für die Variable Konkurrenzdruck ist die Basisvariable der Konkurrenzindex KKL nach PRETZSCH (1995). Die Konklusion mit der linguistischen Variablen Durchforstungsdringlichkeit erhält einen dimensionslosen Definitionsbereich.

Wird für einen Baum die Durchforstungsdringlichkeit in Abhängigkeit von seiner räumlichen Wuchskonstellation beurteilt, so liegen in der Wirklichkeit oder auch im Rahmen rechnerischer Darstellung stets mehrere Regeln vor, die plausibel angewandt werden können. Ebenso wenig, wie es also eine scharfe Abgrenzung zwischen allen Termen einer linguistischen Variablen gibt, läßt sich eine scharfe Abgrenzung zwischen Regeln ziehen. Zudem ist es möglich, daß eine (Teil)-Prämisse im Einzelfall nur graduell erfüllt ist und demnach auch mehrere Regeln mehr oder weniger zutreffen können. Zur Ermittlung des Erfüllungsgrades der Prämisse wird nun der Minimumoperator gewählt. Dieses Minimum ist ein Gewicht, mit welchem charakterisiert wird, inwieweit eine Regel zutrifft (vgl. KAHN, 1995).

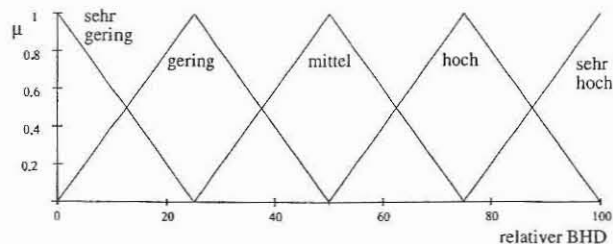


Abb. 2

Die linguistische Variable 'Baumstärke'
The linguistic variable 'tree thickness'

3.2 Verfahren zur Defuzzifizierung

Entscheidend für die Optimierung des Fuzzy Regelsystems ist nun die Repräsentation der Konklusion, die als linguistische Variable erfolgen kann. Dann sind die Konklusionen (z. B. hohe Durchforstungsdringlichkeit) repräsentiert als unscharfe Mengen, ebenso wie die Terme der Eingabevariablen. Alternativ lassen sich die Konklusionen als sogenannte Singletons darstellen. Ein Singleton ist eine reduzierte unscharfe Menge, die nur für einen Punkt definiert ist und einen Funktionswert $\mu_{\text{Konklusion}}$ von 1 aufweist. Ist die Prämisse mit dem Grad $\mu_{\text{Prämisse}}$ erfüllt, so folgt für die Konklusion einer Regel, die sich aus dem Term i der Teilprämisse 1 und dem Term j der Teilprämisse 2 zusammensetzt:

$$\mu_{\text{Regel}, ij} = \mu_{\text{Konklusion}} \cdot \mu_{\text{Prämisse}} = \mu_{\text{Prämisse}} \quad (1)$$

Da nun mehrere Regeln graduell zutreffen können, ergibt sich eine Gesamtkonklusion der Regelmenge: Die mit den Erfüllungsgraden der Prämissen gewichteten Singletons der Konklusionen sind also geeignet zu verknüpfen. Dies geschieht mittels des Maximumoperators, so daß es sich um eine Max-Prod-Inferenz handelt (vgl. KAHN, 1995).

Insoweit die einzelnen Konklusionen als Singletons vorliegen, ist die Defuzzifizierung der über den Maximum-Operator verknüpften Konklusionen naheliegend und einfach. In Anlehnung an das Flächenschwerpunkt-Verfahren wird das Verfahren 'Schwerpunkt der Singletons' gewählt. Bezeichnet r_{ij} die Position des Singletons auf der x-Achse für die Konklusion einer Regel ij , die sich aus dem Term i der Teilprämisse 1 und dem Term j der Teilprämisse 2 zusammensetzt, so folgt für alle Regeln ij der Regelmenge die defuzzifizierte Konklusion \bar{r} als:

$$\bar{r} = \frac{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij} \cdot r_{ij}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}} \quad (2)$$

Der Wert \bar{r} läßt sich inhaltlich in dem gegebenen Kontext des Durchforstungsmodells interpretieren als Quantifizierung der Durchforstungsdringlichkeit unter Berücksichtigung sämtliche Regeln (Abb. 3). Im Vergleich zu einer Defuzzifizierung mit dem Flächenschwerpunktverfahren sinkt der Rechenaufwand erheblich.

3.3. Optimierung der Konklusion

Mit dem Verfahren zur Defuzzifizierung ist ein großes Potential zur Reduktion des Rechenaufwandes und zur empirischen Optimierung des Fuzzy Regelsystems verbunden (vgl. KECMAN und PFEIFFER, 1994). Falls Datenmaterial zu Eingabe- und Ausgabegrößen des

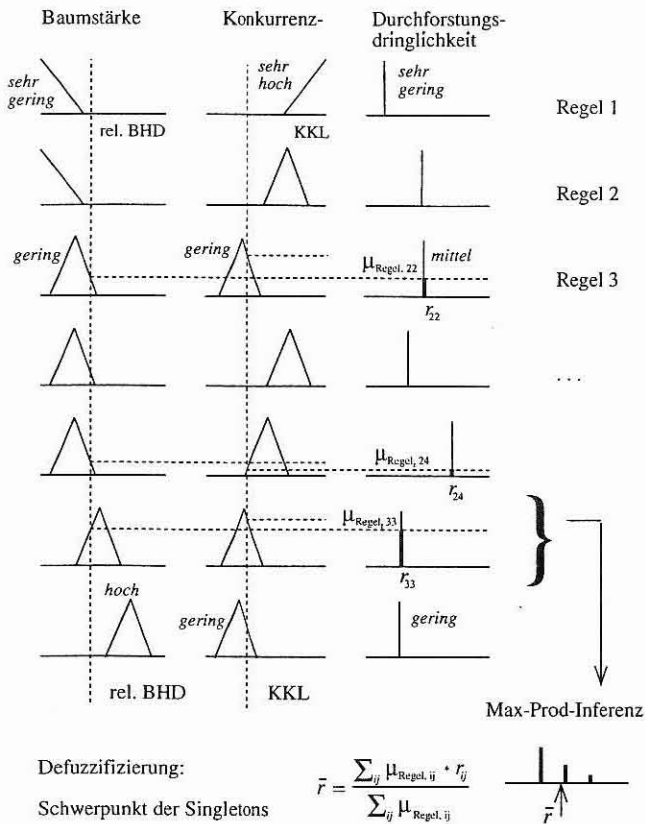


Abb. 3

Regelmenge und Defuzzifizierung. $\mu_{\text{Regel}, ij}$ ist der Erfüllungsgrad einer Regel mit Term i von Teilprämisse 1 und Term j von Teilprämisse 2. r_{ij} ist der x-Achsenwert der entsprechenden Konklusion

Rule base and defuzzification. $\mu_{\text{Regel}, ij}$ is the degree of fulfillment of a rule with term i of subpremise 1 and term j of subpremise 2. r_{ij} is the value at the x-axis of the corresponding conclusion

Regelsystems vorhanden ist, so ergibt sich nämlich für jeden Datensatz aus der Gleichung (2) die folgende Beziehung

$$\hat{r} = \frac{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x) \cdot r_{ij}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \varepsilon, \quad (3)$$

wobei \hat{r} die einem Baum zugeordnete Durchforstungsdringlichkeit ist, die eine geeignete Quantifizierung der linguistischen Terme sehr gering, gering, mittel, hoch oder sehr hoch ist. Falls angenommen wird, daß die Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen der Terme der Eingabevariablen Baumstärke und Konkurrenzdruck konstant sind, so folgt mit

$$\hat{r}_m = \frac{\mu_{\text{Regel}, 11}(x_m) \cdot r_{11}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \frac{\mu_{\text{Regel}, 12}(x_m) \cdot r_{12}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \dots + \frac{\mu_{\text{Regel}, NK}(x_m) \cdot r_{NK}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \varepsilon_m, \quad (4)$$

daß für m Datensätze mit $m = 1(1)M$ bei m gegebenen Eingabewerten und Konklusionen \hat{r}_m die Parameter r_{ij} konstant sind. Die Variable x_m kennzeichnet einen Vektor, der die für einen Baum spezifi-

schene Werte zu relativer Summenhäufigkeit des Baumdurchmessers und des Konkurrenzindex KKL beinhaltet. Die Parameter r_{ij} lassen sich mittels eines linearen Regressionsansatzes schätzen über das Gleichungssystem (5):

$$\begin{aligned} \hat{r}_1 &= \frac{\mu_{\text{Regel}, 11}(x_1) \cdot r_{11}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \frac{\mu_{\text{Regel}, 12}(x_1) \cdot r_{12}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \dots + \frac{\mu_{\text{Regel}, NK}(x_1) \cdot r_{NK}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \varepsilon_1 \\ \hat{r}_2 &= \frac{\mu_{\text{Regel}, 11}(x_2) \cdot r_{11}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \frac{\mu_{\text{Regel}, 12}(x_2) \cdot r_{12}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \dots + \frac{\mu_{\text{Regel}, NK}(x_2) \cdot r_{NK}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \varepsilon_2 \\ &\dots \\ \hat{r}_M &= \frac{\mu_{\text{Regel}, 11}(x_M) \cdot r_{11}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \frac{\mu_{\text{Regel}, 12}(x_M) \cdot r_{12}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \dots + \frac{\mu_{\text{Regel}, NK}(x_M) \cdot r_{NK}}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)} + \varepsilon_M \end{aligned} \quad (5)$$

Für dieses Gleichungssystem der Form $\vec{y} = A \cdot \vec{r}$ gilt somit: \vec{y} hat die Dimension M und \vec{r} hat die Dimension N · K, wobei N die Anzahl der linguistischen Terme der Teilprämisse 1 und K die Anzahl der linguistischen Terme der Teilprämisse 2 ist. Die Matrix A hat also M Zeilen und N · K Spalten, so daß die Matrix $A^T A$ die Dimension N · K x N · K besitzt. Dies ist von Bedeutung, weil somit die Inverse von $A^T A$ unabhängig von der Anzahl der Datensätze gut berechenbar und mit $\vec{r} = (A^T A)^{-1} A^T \vec{y}$ die Parameterschätzung nach der Methode der kleinsten Quadrate möglich ist.

Damit ist ein erster Schritt zur Optimierung des Fuzzy Regelsystems bereits getan: Die Konklusionen lassen sich statistisch mittels linearer Regression optimal an ein gegebenes Datenmaterial anpassen. Daraus folgt demnach ein optimiertes Design der Regelbasis, und die Unsicherheit, welche Konklusion mit einer bestimmten Kombination der Teilprämissen verbunden ist, ist beseitigt. Es verbleibt noch das nichtlineare Problem, wie die Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Variablen der Teilprämissen zu wählen sind. Eine Lösung dieses Problems wird mit Hilfe evolutionärer Strategien angegangen.

4. EVOLUTIONÄRE STRATEGIEN ZUR PARAMETEROPTIMIERUNG

4.1. Biologische Prinzipien

Evolutionäre Strategien sind ein seit einigen Jahren weit verbreitetes Mittel geworden, nichtlineare Optimierungsprobleme zur Parameterschätzung zu bewältigen. Zahlreiche Anwendungsbeispiele dazu kommen aus dem Bereich der Optimierung von Fuzzy Systemen, die vor allem bei ingenieurtechnischen Fragestellungen häufigen und wirkungsvollen Einsatz gefunden haben (ELITE, 1993 und 1994; GLORENNEC, 1994). Bei evolutionären Algorithmen zur Lösung von Optimierungsaufgaben werden Prinzipien angewendet, wie sie auch in biologischen Evolutionsprozessen vorkommen.

Diese biologischen Prinzipien sind im wesentlichen die Prozesse Selektion, Rekombination und Mutation. Bei diesen Prozessen sind zufällige Ereignisse ein wichtiges Merkmal. Darüber hinaus spielt das Prinzip der Parallelität eine große Rolle, was besagt, daß das „Wissen“ über optimale Lösungen über die Individuen einer Population verteilt ist. Diese Prinzipien gilt es nun, geeignet auf die Fragestellung zur Optimierung eines Fuzzy Regelsystems zu übertragen.

4.2. Population, Parallelität und Genetische Kodierung

Ein erster Schritt bei der Entwicklung eines evolutionären Algorithmus besteht in der Definition der Population, die evolutiven Prozessen unterliegt. In biologischen Systemen ist eine Population u. a. eine abgegrenzte Menge von Individuen, die Individuen sind die Informationsträger bzw. die Träger der Gene. Hier wird jeder Term einer linguistischen Variablen als Individuum definiert. Entsprechend den beiden Teilprämissen zu Baumstärke und Konkurrenzdruck gibt es also 2 Populationen.

Eine Population hat mehr Individuen als die 5 definierten Terme einer linguistischen Variablen: Es existieren parallel für jeden Term mehrere Individuen, die um einen Platz in der Population konkurrieren.

Die Gene der Individuen sind die Parameter der Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Terme. Es werden trapezförmige Zugehörigkeitsfunktionen gewählt, die abschnittsweise linear definiert sind als

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & , a \leq x \leq b \\ 1 & , b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & , c \leq x \leq d \\ 0 & , \text{sonst} \end{cases} \quad (6)$$

und die 4 Parameter a, b, c und d aufweisen. Für diese Parameter gilt:

$$a \leq b \leq c \leq d \quad (7)$$

Gelten für den Term „mittel“ die Parameter a_m, b_m, c_m und d_m und für den Term „gering“ die Parameter a_g, b_g, c_g und d_g , so wird definiert, daß

$$c_g = a_m \quad (8)$$

und

$$d_g = b_m \quad (9)$$

Heißen die Parameter des Terms „hoch“ a_h, b_h, c_h und d_h , so gelten zusätzlich die Restriktionen:

$$a_h = c_m \quad (10)$$

und

$$b_h = d_m \quad (11)$$

Damit wird die ordinale Ordnung der Terme der linguistischen Variablen auf die metrische Ordnung ihrer Parameter übertragen. Hat ein Term 4 Parameter und eine linguistische Variable 5 Terme, so weist eine linguistische Variable 20 Parameter auf. Bei 2 linguistischen Variablen handelt es sich schon um 40 Parameter. Da anstelle von 2 Teilprämissen nahezu beliebig viele Teilprämissen in der Regelmenge auftreten können, kann die Parameterzahl schnell beträchtlich anwachsen, was die Suche nach optimalen Parameterlösungen unter Nebenbedingungen sehr erschwert.

Problematisch ist oftmals die Wahl einer wirkungsvollen genetischen Kodierung der in der Population verteilten Information. In Gleichung (6) entspricht dies der Suche nach dem Definitionsbereich und der Darstellung der Variablen x. Häufig wird anstelle des dekadischen Zahlensystems eine binäre Kodierung eingesetzt, so daß die Werte x als Abfolgen der Zahlen 0 und 1 vorliegen. Damit sollen v. a. interpretierbare Mechanismen der Rekombination sichergestellt werden. Hier wird keine spezielle Kodierung der Gene vorgenommen, d. h. Baumstärke (relativer BHD) und Konkurrenzdruck (Konkurrenzindex KKL) verbleiben in der Darstellung als reelle Zahlen.

4.3. Selektion und Optimalität

Im Rahmen der Selektion erfolgt eine Bewertung der Parameterpopulation in 2facher Hinsicht. Erstens wird entschieden, welche Individuen sich vererben, d. h. als Elternterme infrage kommen. Zweitens wird entschieden, welche Nachkommen in der Population (kurzzeitig) überleben, auch ohne eigene Nachkommen zu erzeugen.

Zur Bewertung der Parameterpopulation wird ein Optimalitätskriterium benötigt: Dies ist die Summe der Abweichungsquadrate, die aus der linearen Regressions-schätzung der Konklusionsparameter folgt. Ist also für die linguistischen Variablen Baumstärke und Konkurrenzdruck ein Parametersatz gegeben, so werden über lineare Regression die Konklusionsparameter geschätzt. Da aufgrund der Parallelität durch Kombination verschiedener Individuen mehrere Parametersätze für die linguistischen Variablen vorliegen, kann für diese ein Vergleich der Summe der Abweichungsquadrate erfolgen.

Zur Selektion der Individuen, die sich vererben, wird lediglich eine uniform verteilte Zufallsvariable gezogen. Die Wahrscheinlichkeit, welcher Elternterm sich vererbt, ist für alle Terme gleich. Die Parametersätze der Nachkommen werden dann mittels der linearen Regressions-schätzung bewertet. Nur der beste Parametersatz, als zusammengehörige Menge von Individuen sozusagen eine Familie, wird übernommen. Dadurch kommt es zu einer genetischen Drift, die Selektion wird also durch die Wahl der Nachkommenschaft gerichtet.

4.4. Rekombination und genetische Operatoren

Durch Rekombination kommt es bei der Vererbung zu einem Informationsaustausch zwischen Individuen, zwischen Vaterterm und Mutterterm. Zur mathematischen Formalisierung dieses Vorganges wird ein genetischer Operator benötigt. Als solcher wird eine Linearkombination zwischen den entsprechenden Parametern der Eltern festgelegt, z. B. gilt für den Parameter a (vgl. Gleichung (6)):

$$a_{\text{Nachkomme}} = \lambda \cdot a_{\text{Vater}} + (1-\lambda) \cdot a_{\text{Mutter}} \quad (12)$$

Die Rekombination wird stark von Zufallseffekten überlagert. Daher wird λ als uniform verteilte Zufallsvariable definiert, die Werte zwischen 0 und 1 annehmen kann. Daraus folgt in Zusammenhang mit Gleichung (7), daß die Parameterwerte eines von 2 Elterntermen erzeugten Nachkommen intermediär sind, d. h. gleich den Parameterwerten eines der Eltern sind oder zwischen den Parameterwerten der Eltern liegen müssen.

Die Auswahl der Elternterme, die zur Vererbung kommen, unterliegt nicht nur selektiven Restriktionen: Als Eltern werden nur solche Terme gewählt, die nicht unmittelbar nebeneinander liegen, zwischen denen sich aber höchstens ein weiterer Term befindet. Das Vorgehen bei der Rekombination ist dann folgendes (Abb. 4):

- 1.) Erzeugung eines ersten Nachkommen entsprechend Gleichung (12).
- 2.) Erzeugung eines 2. Nachkommen, der graphisch gesehen den linken Elternraum abdeckt und mit seinem Parameter c bzw. d gleich dem Parameter a bzw. b des 1. Nachkommen ist.

- 3.) Erzeugung eines 3. Nachkommen, der graphisch gesehen den rechten Elternraum abdeckt und mit seinem Parameter a bzw. b gleich dem Parameter c bzw. d des 1. Nachkommen ist.
- 4.) Die beiden Elternterme werden aus der Population entfernt, ebenso der Term, der zwischen den Elterntermen lag.

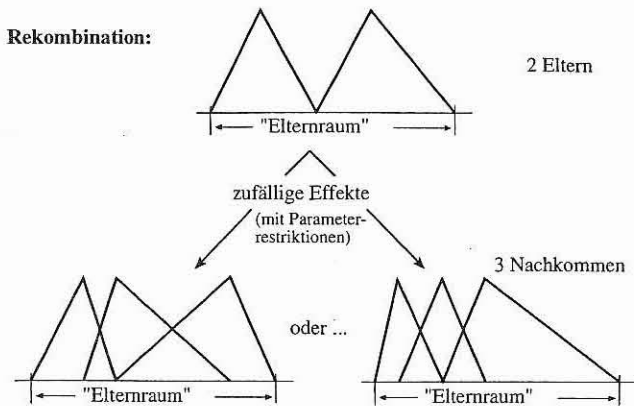


Abb. 4

Evolutionäre Strategien zur Optimierung eines Fuzzy Regelsystems. Oben: Rekombination, die Parameterlösungen können den Elternraum nicht verlassen. Unten: Die zufälligen Effekte der Mutation können und sollen zu sprunghaften Änderungen im Parameterlösungsraum, auch außerhalb des Elternraumes, führen

Evolutionary strategy for optimizing a fuzzy rule based system. Top: recombination, the parameter solutions are within the parents space. Bottom: the random effects of mutation lead to abrupt changes in the parameter solutions which can be outside the parents space

Für die 'Randterme' der linguistischen Variablen (sehr gering, sehr hoch) gelten leicht modifizierte Rekombinationsverfahren.

4.5. Mutation

Die Selektion führt über das Kriterium der Optimalität zu einer gerichteten Veränderung der Population. Gerade bei nichtkonvexen Kurvenverläufen der Optimierungsfunktion, die hier analytisch nicht in geschlossener Form vorliegt, sondern algorithmisch in der Regelmenge und in den Inferenzmechanismen verborgen ist, kann dies zu unerwünschten Parameterlösungen bei lokalen Minima führen. Das Auffinden globaler Minima wird dadurch erschwert.

Bei Verwendung evolutionärer Algorithmen helfen Mutationsmechanismen über diese Hürde hinweg. Wenngleich auch schon bei der Rekombination Zufallseffekte zu „nicht benachbarten“ Parameterlösungen führen und damit aus lokalen Minima heraushelfen können, so bietet die Mutation den Nachkommen die Möglichkeit, den Parameterraum der Eltern zu verlassen (vgl. Abb. 4). Dies ist bei der Rekombination nicht möglich.

Algorithmisch wird die Mutation charakterisiert durch eine Mutationsrate und eine Mutationsstrecke. Die Mutationsrate ist eine Wahrscheinlichkeit, mit der bei der Vererbung eine Mutation auftritt.

Die Mutationsstrecke vergrößert den Parameterraum der Eltern und ist hier relativ an die Größe des Elternraumes gekoppelt. Allerdings wird nicht in jedem Fall, in dem Mutation auftritt, der Parameterwert des Nachkommen um die volle Mutationsstrecke M_S verändert, sondern zusätzlich mit einem uniform verteilten Zufallswert κ verknüpft, der zwischen -1 und $+1$ liegt. Gleichung (12) wird somit zu:

$$a_{\text{Nachkomme}} = \lambda \cdot a_{\text{Vater}} + (1-\lambda) \cdot a_{\text{Mutter}} + \kappa \cdot M_S \quad (13)$$

Damit bei der Mutation in der Folge keine unzulässigen Parameterlösungen auftreten können, wird darauf geachtet, daß stets die Nebenbedingungen (7) bis (11) eingehalten werden. Dabei wird die Parameteränderung des mutierten Terms zugelassen, und die Parameterwerte sämtlicher Nachbarterme werden entsprechend angepaßt.

4.6. Evolutionärer Algorithmus

Der Algorithmus zur nichtlinearen Optimierung der Parameter des Fuzzy Regelsystems gliedert sich nun zusammenfassend in 6 Schritte:

- 1.) Durchforstungstraining am Wachstumssimulator zur einmaligen Erzeugung von baumbezogenen Lerndaten mit Ausgabegröße \hat{r}_m , $m = 1(1)M$, und den Eingabegrößen relativer BHD sowie Konkurrenzindex KKL.
- 2.) Unter gegebenen, 5 alternativen Parametersätzen für die linguistischen Variablen Baumstärke und Konkurrenzdruck wird für alle Regeln ij der Erfüllungsgrad der Prämissen $\mu_{\text{Regel}, ij}(x_m)$ bestimmt. Jede Regel ij ist definiert durch die Kombination von Term i der Teilprämisse 1 mit Term j der Teilprämisse 2.
- 3.) Die Ausgabegrößen \hat{r}_m und die über die Summe der Erfüllungsgrade aller Prämissen normierten Erfüllungsgrade der einzelnen

Prämissen $\frac{\mu_{\text{Regel}, ij}(x_m)}{\sum_{ij} \mu_{\text{Regel}, ij}(x)}$ werden an das Modell zur linearen

Regressionsschätzung der Parameter der Konklusionen übergeben (Gleichung (5)). Dabei wird die Summe der Abweichungsquadrate ermittelt, und zwar für jeden der unter Schritt 2 vorkommenden Parametersätze.

- 4.) Es wird überprüft, ob das Ziel der Optimalität erreicht ist. Als Abbruchkriterium kann ein Grenzwert für die mittlere quadratische Abweichung definiert werden. Damit der Algorithmus auch dann abbricht, wenn über die Summe der Abweichungsquadrate keine Konvergenz erreicht wird, dient die Anzahl der Generationen als zeitlich orientiertes Abbruchkriterium. Jedesmal, wenn im Algorithmus Schritt 4 durchlaufen wird, erhöht sich die Anzahl der Generationen um 1. Bricht der Algorithmus aus einem der beiden Gründe ab, so werden die folgenden Schritte 5 und 6 nicht mehr durchlaufen und es schließt sich die Ausgabe der Ergebnisse an.

5.) Es erfolgt eine Selektion der Nachkommen. Der Parametersatz bzw. die Teilpopulation, die unter Schritt 3 im Vergleich mit der bisher besten Lösung die niedrigste Summe der Abweichungsquadrate erzielt hat, wird übernommen. Alle anderen Parametersätze werden vernichtet.

6.) Von dem verbliebenen Parametersatz werden 5 Varianten abgeleitet (Parallelität). Die Ableitung der Varianten geschieht mittels Selektion der Elternterme, Rekombination und Mutation. Der Algorithmus setzt fort mit Schritt 2.

5. ERGEBNISSE

5.1. Verlauf der Optimierung

Die Veränderung der Summe der Abweichungsquadrate über mehrere Generationen hinweg zeigt eine deutliche Verbesserung der Modellanpassung. Die erste Summe der Abweichungsquadrate in der Generation 0 liegt bei 44,8. Dies ist das Resultat einer normativen

Festlegung der linguistischen Variablen, d. h. der jeweiligen Anzahl der linguistischen Terme sowie deren Parameter. Die Konklusionen sind dabei entsprechend dem linearen Regressionsansatz bereits unter den gegebenen Parametersätzen optimal. Aus Abbildung 5 wird deutlich, daß eine starke Verbesserung des Modells in die zweite Generation fällt, wo die Quadratsumme der Residuen von 42,5 auf 36 sinkt. Dies ist das Resultat eines evolutionären Prozesses, bei dem 5 alternative Parametersätze durch Rekombination erzeugt werden und bei dem die Mutationsrate bei 1 liegt. Bei einer Mutationsrate von 0 sinken die Quadratsummen der Residuen in der 2. Generation sogar noch etwas stärker.

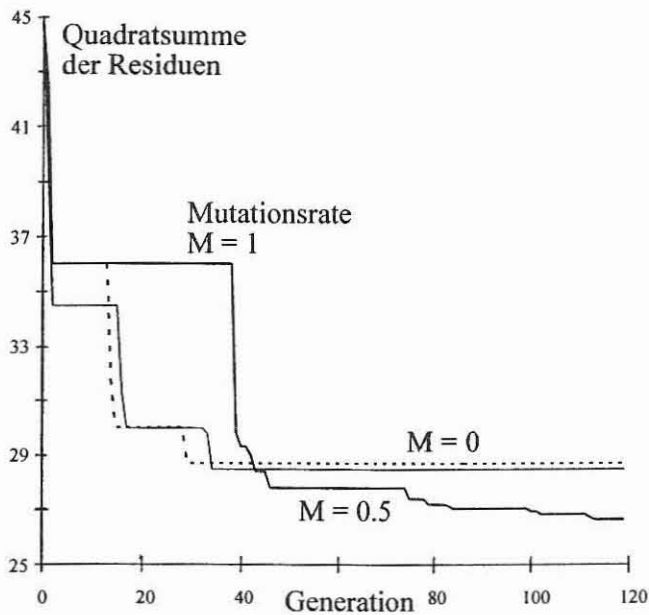


Abb. 5
Veränderung der Quadratsumme der Residuen unter dem Einfluß der evolutionären Optimierungsstrategie
Changes in the square sums of the residuals as a result of the evolutionary optimization process (M = rate of mutation)

Der weitere Verlauf der Quadratsummen der Residuen zeigt, daß schon in der 2. Generation bei einer Mutationsrate von 1 ein offensichtlich recht stabiles lokales Minimum erreicht worden ist (Abb. 5). Erst in der 39. Generation kann dieses lokale Minimum wieder verlassen werden, und der neue Optimalwert liegt bei ca. 30. Danach werden keine deutlichen Verbesserungen mehr möglich. Dies liefert einen Hinweis dafür, daß der evolutionäre Algorithmus noch effizienter gestaltet werden kann, indem nach einer bestimmten Anzahl von Generationen, bei der keine Verbesserung erzielt wurde, eine Veränderung der Mutationsstrecke erfolgt. Dadurch könnte es möglich werden, an einer beliebigen Stelle im Lösungsraum eine neue Parameterpopulation zu etablieren, von der aus eine weitere Suche mit veränderter Erfolgswahrscheinlichkeit gestartet wird. Bei niedrigen Mutationsraten sinken die Quadratsummen der Residuen deshalb etwas gleichmäßiger, weil bei ausschließlich durch Rekombination bedingten Parameteränderungen die Sprünge im Parameterraum kleiner werden.

Die Kurvenverläufe der Quadratsummen der Residuen unterscheiden sich je nach Mutationsrate (Abb. 5). Entscheidend ist offensichtlich, daß die Mutationsrate echt größer als 0 ist. Dadurch können lokale Minima leichter verlassen werden. Grundsätzlich können auch die zufälligen Effekte bei der Rekombination dazu führen, daß der Weg aus einem lokalen Minimum heraus gefunden wird. Bei den niedrigeren Mutationsraten von 0,5 bzw. 0 ist der Ab-

fall der Quadratsummen der Residuen weniger abrupt als bei einer Mutationsrate von 1. Dies liegt möglicherweise daran, daß bei Parameteränderungen, die nur durch Rekombination hervorgerufen werden, eher benachbarte Lösungen erzielt werden, die in der Umgebung des gleichen lokalen Minimums liegen.

5.2. Veränderungen der linguistischen Variablen

Im Rahmen der nichtlinearen Optimierung werden die Parameter der linguistischen Variablen verändert. Beispielhaft zeigt Abbildung 6 anhand der linguistischen Variablen „Baumstärke“, daß bei der Mutationsrate von 1 etwa die Anzahl der linguistischen Terme von 5 auf 4 reduziert worden ist (vgl. dazu Abb. 1). Dementsprechend ist eine leichte Verschiebung in dem Wertebereich der Terme aufgetreten. Der 5. Term geht dabei fließend in den 4. über, so daß graphisch keine Unterscheidung möglich ist. Theoretisch gibt es jedoch diese 5 Terme, so daß Regeln, welche den 5. Term in der Prämisse beinhalten, ebenfalls echt positive Erfüllungsgrade der Prämissen aufweisen können (aber nicht müssen).

Bei einer Mutationsrate von 0,5 ergibt sich ein etwas anderes Bild der linguistischen Variablen „Baumstärke“ (Abb. 6). Zwar ist die Anzahl der Terme die gleiche wie bei einer Mutationsrate von 1, aber die Terme selbst sind durch unterschiedliche Zugehörigkeitsfunktionen definiert. Da bei einer Mutationsrate von 0,5 nach 120 Generationen im evolutionären Optimierungsprozeß noch nicht die gleiche Quadratsumme der Residuen erreicht war wie bei einer Mutationsrate von 1, waren identische Termdefinitionen auch nicht zu erwarten. Allerdings hätten auch bei gleichen Quadratsummen der Residuen unterschiedliche Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Terme aus unterschiedlichen lokalen Minima resultieren können.

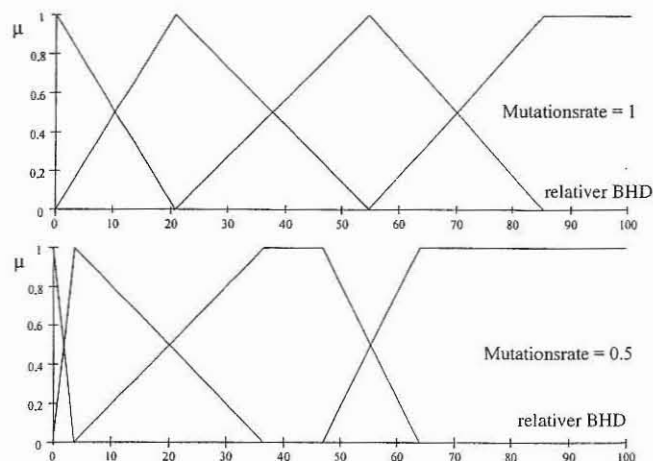


Abb. 6
Veränderung der linguistischen Variablen Baumstärke als Ergebnis des evolutionären Optimierungsprozesses bei verschiedenen Mutationsraten. Die Ausgangsstruktur der linguistischen Variable 'Baumstärke' zeigt Abbildung 2
Changes in the parameters of the linguistic variable 'tree thickness' as a result of the evolutionary optimization process in dependence on different rates of mutation. The original structure of the linguistic variable 'tree thickness' is depicted in figure 2

5.3. Anpassung der Konklusionen

Die Konklusionen der Regeln wurden mittels linearer Regressions-schätzung optimiert. Bei einer Mutationsrate von 1 ergeben sich die in Tabelle 1 zusammengefaßten Werte.

Tab. 1
Parameter der Konklusionen

Baumstärke		Konkurrenzdruck				
		1	2	3	4	5
1	Konklusion	-0,19	1,31	1,42	2,24	0
	Varianz	9,7	2,3	0,17	0,03	0
	Anzahl	2	14	96	160	0
2	Konklusion	1,33	2,42	3,69	4,42	0
	Varianz	0,81	0,06	0,02	0,01	0
	Anzahl	16	127	315	308	0
3	Konklusion	1,33	2,64	4,32	5,53	0
	Varianz	0,15	0,02	0,03	0,30	0
	Anzahl	85	240	187	33	0
4	Konklusion	1,79	0,78	2,2	0	0
	Varianz	0,23	0,60	8,0	0	0
	Anzahl	53	73	20	0	0
5	Konklusion	0	4,15	0	0	0
	Varianz	0,27	8,90	0	0	0
	Anzahl	13	13	0	0	0

Konklusion = Wert der Konklusion (Position des Singletons) als Resultat der linearen Regressionsschätzung; Varianz = Varianz der Konklusion; Anzahl = Anzahl der Datensätze mit echt positivem Erfüllungsgrad der Prämisse; Baumstärke = Teilprämisse „Baumstärke“; Konkurrenzdruck = Teilprämisse „Konkurrenzdruck“; Werte 1 bis 5 von „Baumstärke“ und „Konkurrenzdruck“ = Terme gering (1) bis hoch (5).

Es zeigt sich deutlich, daß ein 5. Term zur Charakterisierung des Konkurrenzdruckes in bezug auf die Durchforstungsdringlichkeit nicht benötigt wird, da für diesen alle Konklusionen 0 sind (letzte Spalte in Tab. 1). Diese Nullwerte sind nicht ein numerisches Schätzergebnis der linearen Regression, sondern für diese Konklusion wurde keine Schätzung vorgenommen, weil es keine Datensätze mit der Teilprämisse „die Konkurrenz ist sehr hoch“ und echt positivem Erfüllungsgrad gab. Die bei der linearen Regressionsschätzung verwendete *Singular Value Decomposition* (PRESS et al., 1992) erkennt diese Singularitäten, die in Tabelle 1 daran kenntlich sind, daß die Variable „Anzahl“ 0 ist.

Wegen der linearen Regressionsschätzung der Konklusionsparameter ist nun eine einzelne Regel nicht mehr leicht interpretierbar. Tendenziell gilt inhaltlich, je größer der Wert der Konklusion, umso größer ist die Durchforstungsdringlichkeit. Die Beschaffung der Trainingsdaten erfolgte unter dem Konzept einer Hochdurchforstung. Dies spiegelt sich in den Konklusionen wider. Am größten sind die Konklusionen bei mittleren Baumstärken und bei hohem Konkurrenzdruck. Entscheidend ist bei der inhaltlichen Interpretation jedoch nicht die einzelne Regel, sondern das Gesamturteil, welches sich rechentechnisch aus der Max-Prod-Inferenz über sämtliche Regeln ergibt.

6. DISKUSSION

6.1. Praxisorientierte Aspekte des Durchforstungstrainings

Das Programmmodul zum Durchforstungstraining, welches dem Wachstumssimulator SILVA implementiert ist, wurde im konkreten Anwendungsfall konzipiert, um für die Fallstudie der Optimierung des regelbasierten Durchforstungsmodells Lerndaten zu erzeugen. Die simulationsgestützte Erzeugung von Lerndaten steht vor dem Hintergrund, den Wachstumssimulator SILVA auch als Lehr- und Übungswerkzeug einsetzen zu können. Es soll damit möglich sein, interaktiv am Computer einen zur Wachstumssimulation gewählten Beispielbestand zu durchforsten. Das Durchfor-

stungsmodul des Simulators soll dann zusätzlich in der Lage sein, aus den vom Benutzer geführten Durchforstungseingriffen zu lernen, indem vorhandene Entnahmeregeln verändert oder neue Regeln erzeugt werden. Diese Entnahmeregeln werden dann im Laufe der Wachstumssimulation bei den zu führenden Durchforstungseingriffen angewandt.

Praktisch ist es wohl nicht immer sinnvoll, eine vollständig neue Regelbasis zu erzeugen, weil dies zuviel Zeit in Anspruch nehmen könnte. Es scheint hingegen praktikabel zu sein, eine vorhandene Regelmenge zu modifizieren. So könnte die Notwendigkeit anstehen, für einen Fichten-Buchen-Mischbestand bestimmte Eingriffsarten simulativ zu analysieren. Es wäre dann möglich, auf eine Regelmenge zurückzugreifen, die für eine Hochdurchforstung in Buchen-Reinbeständen konzipiert worden ist. Mit dem Trainingsmodul des Durchforstungsmodells können dann spezielle Wuchskonstellationen erzeugt werden, die vorwiegend Konkurrenzsituationen zwischen Fichte und Buche widerspiegeln. Diese Situationen lassen sich dann durch den Modellanwender im Hinblick auf Durchforstungsnotwendigkeiten von Einzelbäumen interaktiv bewerten. Die Bewertungen werden dann genutzt, um auf Basis der evolutionären Strategien die ursprünglich für Hochdurchforstungen in Buchen-Reinbeständen konzipierten Regelmengen adäquat anzupassen.

6.2. Evolutionäre Strategie als Metaheuristik

Von einem methodischen Standpunkt aus gesehen handelt es sich bei der entwickelten evolutionären Strategie um eine Metaheuristik zur Lösung nichtlinearer Optimierungsprobleme. Das Verfahren ist deshalb ein Metaverfahren, weil es auf andere Methoden zum Zwecke der Optimierung unterstützend zurückgreift. Die benutzten Methoden sind eine lineare Regressionsschätzung sowie die evolutionären Strategien der Selektion, Rekombination und Mutation.

Das Optimierungsverfahren soll als Heuristik bezeichnet werden, weil insbesondere die Rekombination nicht gerichtet erfolgt, sondern ebenso wie die Mutation mit zufallsgesteuerten genetischen Operatoren arbeitet. Daher kann nicht ausgeschlossen werden, daß eine möglicherweise optimale Lösung übersprungen wird. Offensichtlich hat also der genetische Algorithmus selbst eine hohe Zahl an Freiheitsgraden, welche die Optimierung von Selektions- sowie Rekombinations- und Mutationsmechanismen betrifft.

Die Resultate, die durch die evolutionäre Strategie erzielt werden, sind in bezug auf die Ausgangssituation dennoch sehr zufriedenstellend. Die größte Sicherheit bei der Metaheuristik bietet dabei die lineare Regressionsschätzung der Konklusionen, denn diese normativ anzupassen, ist vor allem bei umfangreichen Regelmengen keine leichte Aufgabe.

7. ZUSAMMENFASSUNG

Die Modellierung von Durchforstungseingriffen ist ein zentraler Teilkomplex bei der Entwicklung von Waldwachstumssimulatoren. Als Zusatzmodul für den baumpositionsabhängigen Einzelbaumwachstumssimulator SILVA wurde daher ein Durchforstungsmodell konzipiert, dessen zentrales Prinzip ein Fuzzy Logik basiertes Regelsystem ist. Kernelement dieses Fuzzy Logik basierten Modells ist eine Regelmenge, mit der sowohl normative Durchforstungsvorschriften als auch menschliches Entscheidungsverhalten flexibel und gut interpretierbar nachgebildet werden können.

Die Optimierung dieses Fuzzy Regelsystems erfolgt unter Verwendung evolutionärer Strategien. Diese setzen als Metaverfahren eine lineare Regressionsschätzung ein, um die durch Singletons repräsentierten Regelkonklusionen optimal zu positionieren. Die der Regressionsschätzung zugrunde liegenden Daten wurden mit Hilfe des Wachstumssimulators SILVA interaktiv erzeugt, wozu eine graphisch unterstützte Schnittstelle zur benutzerdefinierten Durchforstung entwickelt worden ist.

Die Parameter der linguistischen Variablen, die zur mathematischen Repräsentation verbaler Begriffe definiert wurden, werden unter Anwendung der evolutionären Strategien Selektion, Rekombination und Mutation optimiert. Als Bewertungskriterium des Selektionsprozesses wird die Quadratsumme der Residuen herangezogen, die sich aus der linearen Regressionschätzung zur Anpassung der Regelkonklusionen ergibt. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung der Anpassungsgüten zwischen Daten und Modellprognosen. Durch die Anwendung evolutionärer Strategien wurde somit methodisch ein Zugang zur empirischen Parametrisierung hochkomplexer Fuzzy Regelsysteme geschaffen.

8. Summary

Title of the paper: *Optimizing a high parameterized fuzzy system with evolutionary algorithms.*

Modelling thinning impacts is one of the most central tasks in developing growth models. As supplementary tool to the single tree distance-dependent growth simulator SILVA a thinning model is designed which is based on a fuzzy logic rule base. To optimize this highly parameterized fuzzy system empirically an evolutionary algorithm is implemented which serves as a meta method for a non-linear optimization process. This meta method uses a linear regression approach to optimize the conclusions of the rule base, following an off line defuzzification applying the center of singletons method. The data are generated using the growth simulator SILVA as an interactive thinning support system which provides the user with graphical and numerical interfaces to optimize the single tree dependent thinning decision.

Beneath the central part of the linear regression fit using a singular value decomposition there are the evolutionary strategies of selection, recombination and mutation applied to optimize the parameters of the linguistic variables. These linguistic variables are necessary to model the premises of the rules. To evaluate a given parameter set for the linguistic variables the square sum of the residuals of the linear regression estimations is used.

The results show a remarkable improvement in the design of the thinning model after applying the evolutionary optimization method. The parameters of the linguistic variables adapted to solutions which enable a good model behaviour comparing the training data set and model predictions. Thus a methodical access to optimize high parameterized fuzzy systems was achieved.

9. Résumé

Titre de l'article: *Optimisation d'un système normatif »fou« (fuzzy) reposant essentiellement sur des paramètres grâce à des algorithmes évolutifs.*

La modélisation des éclaircies constitue le complexe partiel mais central de développement des simulations de la croissance des forêts.

C'est pourquoi on a conçu un modèle d'éclaircies, qui constitue un module additionnel au simulateur »SYLVA« de la croissance des arbres (considérés comme individus) liée à leur position; son principe fondamental est une »logique floue« (Fuzzy Logik) basée sur un système normatif. L'élément capital de ce modèle, reposant sur la logique floue, est un ensemble de normes qui permettent de décrire aussi bien les principes normatifs des éclaircies que la manière selon laquelle l'homme prend ses décisions et aussi d'interpréter le tout avec exactitude et flexibilité.

L'optimisation de ce système normatif flou est obtenue en utilisant des stratégies évolutives. Ces stratégies mettent en jeu, comme méthode générale, une régression linéaire afin de positionner de façon optimale les conclusions normatives qui se présentent sous forme de »singletons«. Les données à la base de ces évaluations par régression sont fournies interactivement par le simulateur de croissance SYLVA; pour ce faire on a mis au point une interface, par une méthode graphique, pour les éclaircies facilement définies.

Les paramètres des variables »linguistiques« qui ont été définis pour représenter mathématiquement des concepts verbaux ont été optimisés en utilisant des stratégies évolutives: sélection, recombinaison, mutation. Comme critère pour l'évaluation quantitative du processus »sélection« on a eu recours à la somme quadratique des valeurs résiduelles qui apparaissent à partir des régressions multiples lors de l'ajustement des conclusions normatives. Les résultats obtenus montrent une nette amélioration de la concordance entre les données relevées et celles prévues par le modèle. En utilisant des stratégies évolutives on a apporté un plus méthodologique au système normatif flou (Fuzzy), très complexe, basé sur des paramètres empiriques.

J. M.

10. Literatur

- ELITE: First European Congress on Fuzzy and Intelligent Technologies. Aachen, Sept. 7 to 10. Proceedings. Band 1-3, 1667 S., 1993
- ELITE: Second European Congress on Intelligent Techniques and Soft Computing. Aachen. Proceedings. Band 1-3, 1749 S., 1994
- GLORENNEC, P. Y.: Fuzzy Q-Learning and Evolutionary Strategy for Adaptive Fuzzy Control. Aus: ELITE, 1994. S. 35-40, 1994
- KAHN, M.: Die Fuzzy Logik basierte Modellierung von Durchforstungseingriffen. AFJZ 166 9/10, 169-176, 1995
- KECMAN, V. and PFEIFFER, B.-M.: Exploiting The Structural Equivalence of Learning Fuzzy Systems and Radial Basis Function Neural Networks. Aus: ELITE, 1994. S. 58-66, 1994
- PRESS, W. H., FALNNERY, B. P., TEUKOLSKY, S. A. and VETTERLING, W. T.: Numerical Recipes in Pascal. The Art of Scientific Computing. Cambridge University Press, 1992
- PRETZSCH, H.: Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. Forstliche Forschungsberichte München, Nr. 115, 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.: Zum Einfluß des Baumverteilungsmusters auf den Bestandeszuwachs. AFJZ 166 9/10, 190-201, 1995

Neuerscheinung:

Pilotprojekt Burgwald

Mitteilungen der Hessischen Landesforstverwaltung, Band 30

Von B. VON BERLEPSCH, TH. DREES, R. HESS, R. HOCKE, H. JESBERG, G. KALDEN, R. KUBOSCH, E. NORMANN,
K.-P. RÖDIG, G. SCHEELE, U. STIEHL und H.-J. WEIMANN

178 Seiten mit 143 Abbildungen und 9 Tabellen
ISBN 3-89051-164-3, Kartoniert DM 39,40

In Kommission bei J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main

Karger Boden, feuchte Wiesentäler, rauhes nordisches Klima – die natürlichen Verhältnisse waren für eine intensive Nutzung durch die Menschen im Burgwald schon immer bescheiden. Das ist der Grund, warum der Wald in dieser Region seine Dominanz behaupten konnte.

Nutzungsmöglichkeiten boten allein die Wälder. Das blieb nicht ohne Folgen für den Waldzustand. Schütterere Bestockungen, umfangreiche Blößen und ausgehagerte Böden zu Beginn des 19. Jahrhunderts waren typisch für den Burgwald. In den Waldbaumarten Kiefer und später Fichte sah man damals die Chance, den Wald wieder in Ordnung zu bringen.

Heute können sich nicht nur Forstleute und Naturschützer, sondern auch viele an der Natur interessierte Bürgerinnen und Bürger an dem 20 000 Hektar großen zusammenhängenden Waldgebiet erfreuen, in dem neben der Fichte natürlich auch viele andere Laubbaumarten, wie Buche und Eiche und Nadelbaumarten, wie die Lärche und insbesondere im südlichen Teil auch die Kiefer vorkommen.

Daß es zu einem „Pilotprojekt“ Burgwald unter Federführung der Hessischen Landesforstverwaltung kam, ist letztendlich auf den geplanten Bau einer West-Ost-Autobahn mit Trassenverlauf quer durch den Burgwald zurückzuführen. Die Erhaltung der natürlichen Schätze im Burgwald und des Burgwaldes insgesamt rückten in den Vordergrund der Bemühungen von Forstverwaltung, Natur- und Landschaftschutz. Die Waldbewirtschaftung wurde auf naturgemäße Waldwirtschaft umgestellt. Gleichzeitig wurden 2000 Hektar Vorrangflächen für den Naturschutz ausgewiesen, um die Erhaltung der vielen Feuchtbiotope und ihre naturnahe Vernetzung sicherzustellen. Dies bedeutet zum Beispiel die Auflösung und Rücknahme aufgeforsiteter Fichtenbestände in den Wiesen-

tälern oder das Schließen von Entwässerungsgräben, um eine ungehinderte Entwicklung der Natur zu ermöglichen. So können sich Moorgesellschaften wieder etablieren, und viele seltene Tier- und Pflanzenarten erhalten die Möglichkeit, sich zu halten oder wieder auszubreiten, bzw. wieder einzufinden.

Mit dem Biotopverbundsystem Burgwald kann beispielhaft gezeigt werden, wie eine gewachsene waldgeprägte Kulturlandschaft fortentwickelt werden kann. Durch Umstellung auf naturnahe Wirtschaftsweisen und Integration der Naturschutzanliegen haben Forstverwaltung und Naturschutz in gemeinsamen Bemühen ein zukunftsträchtiges Modell entwickelt, dem aller Erfolg zu wünschen ist.

Aus dem Inhalt:

- Das Pilotprojekt Burgwald
- Der Naturraum Burgwald und seine Geschichte
 - Der Naturraum Burgwald
 - Wald- und Forstgeschichte des Burgwaldes
 - Waldökologische Einheiten im Burgwald
- Der Waldzustand heute
- Strukturen und Besonderheiten der Schutzgebiete
 - Die Feuchtgebiete
 - Floristische Besonderheiten der Schutzgebiete
 - Die Fauna im Burgwald
- Der Wald in den Schutzgebieten
- Planungen und Maßnahmen
 - Das Konzept naturgemäßer Waldwirtschaft
 - Waldaufbau (Zielbestockung), Bestandespflege, und Einschlagsplanung, Verjüngung (Bestandeserneuerung), Schutzmaßnahmen
 - Bilanz und Erfahrungen
 - Literatur

J. D. SAUERLÄNDER'S VERLAG · FRANKFURT AM MAIN