

Durchforsten nach Zahlen – mit heuristischen Verfahren zur optimalen Waldbehandlung

ANNETT DEGENHARDT

1. Motivation

Der traditionelle forstliche Ansatz zur Ableitung optimaler Behandlungsvarianten basiert auf der Anlage und Auswertung von Durchforstungsversuchen. Der Nachteil dieser Verfahren besteht jedoch darin, dass Ergebnisse erst nach langfristiger Beobachtung zu erwarten sind. Gleichfalls bieten Versuche auch nur begrenzte Variabilität bei der Parametervariation.

Bestandessimulationsmodelle ermöglichen es dagegen, Bestandesentwicklungen bei unterschiedlichsten Behandlungsvarianten näherungsweise zu prognostizieren. Im Ergebnis können ökologische, ertragskundliche und ökonomische Parameter dargestellt werden, die Vergleiche zwischen den verschiedenen Varianten zulassen. Mit Hilfe des für Brandenburg parametrisierten Wachstumssimulators BWINPro gelingt es, Auswirkungen verschiedenster Durchforstungsweisen auf die Einzelbaum- und Bestandesentwicklung aus waldwachstumskundlicher und betriebswirtschaftlicher Sicht abzuschätzen und Hinweise zu optimalen Behandlungsstrategien zu liefern.

Die im Modell verwendeten Durchforstungsalgorithmen sind so konzipiert, dass sie die in der Praxis üblichen Behandlungsstrategien wie Hochdurchforstung, Niederdurchforstung oder Z-Baum-Freistellung abbilden. Die häufig nur verbal beschriebenen und durch die subjektive Wahrnehmung zusätzlich beeinflussten Durchforstungsweisen werden dabei für das Modell in formale, parameterabhängige Algorithmen umgewandelt. In diesem Schritt der Modellierung scheint es jedoch zu größeren Ungenauigkeiten bzw. Informationsverlusten zu kommen. Daher wurde nach einer Möglichkeit gesucht, optimale Behandlungsstrategien abzuleiten, ohne auf die parameterabhängigen Durchforstungsalgorithmen zurückgreifen zu müssen.

Ausgangspunkt war dabei die Idee, dass die Durchforstung von Beständen ganz konkret immer die Entnahme von einzelnen Bäumen zu bestimmten Zeitpunkten bedeutet, wobei sich die jeweiligen Entnahmezeitpunkte der Einzelbäume aus der aktuellen Wuchskonstellation in deren Umgebung begründen.

Daraus ergab sich folgender Optimierungsansatz: Gesucht sind die Entnahmezeitpunkte für alle Einzelbäume so, dass das beste betriebswirtschaftliche Ergebnis, hier die maximale durchschnittliche jährliche Wertleistung, erzielt wird. Aufgrund der aus diesem Ansatz resultierenden großen Zahl von Variablen wurden die optimalen Lösungen mit Hilfe von heuristischen Verfahren abgeleitet.

Anhand von Kiefernbeständen unterschiedlicher Bonität und unter Berücksichtigung der relativ stark schwankenden Holzpreise der letzten Jahre wird gezeigt, in welchem Maße die gefundenen optimalen Behandlungsstrategien die in der Praxis beschriebenen Durchforstungsweisen widerspiegeln, aber auch, warum sie beachtlich davon abweichen können.

Die Ergebnisse liefern letztendlich dienliche Hinweise über die Zusammenhänge zwischen den Entnahmezeitpunkten von Einzelbäumen und den betriebswirtschaftlichen Ergebnissen für den gesamten Bestand und sollten dazu beitragen können, Strategien der praktischen Bestandesbehandlung abzuleiten.

2. Die Zielgröße der Waldbehandlung

Ziel der folgenden Untersuchungen ist es, mit Hilfe geeigneter Verfahren Auswirkungen verschiedenster Durchforstungsweisen auf die Einzelbaum- und Bestandesentwicklung aus betriebswirtschaftlicher Sicht abzuschätzen, um schließlich optimale Behandlungsstrategien abzuleiten.

Bei der Beurteilung der Optimalität sollten zunächst die Kosten und Erlöse der Bestandesbehandlungen berücksichtigt werden. Als Maß zur Bewertung des betriebswirtschaftlichen Ergebnisses und damit als Zielfunktionswert im Sinne der mathematischen Optimierung dient das **Maximum der durchschnittlichen jährlichen Wertleistung eines Bestandes**. Diese Größe leitet sich wie folgt her.

Der **Wertleistung des Bestandes zum Bestandesalter A** ist die Summe aus den erntekostenfreien Erlösen der bis zu diesem Alter vollzogenen Durchforstungen und des erntekostenfreien Abtriebserlöses des zu diesem Zeitpunkt stehenden Bestandes. Deren Wert setzt sich wie folgt zusammen: Die Erlöse werden über Holzaushaltungsalgorithmen auf der Grundlage vorgegebener Sortimente berechnet. Berücksichtigt wurden dabei sortimentsbezogene brandenburgische Durchschnittserlöse des Jahres 2011. Die Kosten der Bestandesbehandlung beschränken sich auf die Astungs-, Durchforstungs- und Erntekosten. Eine Verzinsung der Kosten und Erlöse erfolgte nicht.

Durch die Umrechnung der Wertleistung des Bestandes auf das jeweilige Bestandesalter erhält man einen Zeitbe-

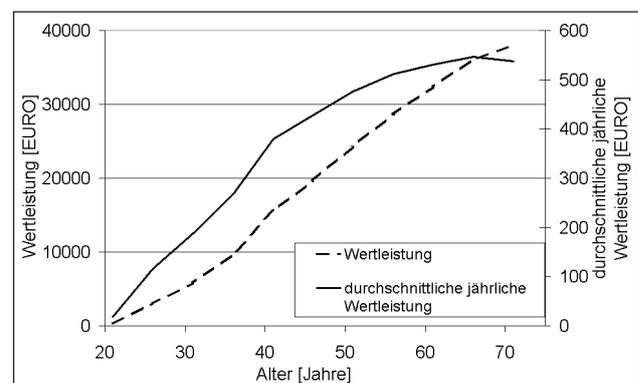


Abb. 1: Entwicklung der Wertleistung und der durchschnittlichen jährlichen Wertleistung des Beispielbestandes Köpenick 187

zug. Die **durchschnittliche jährliche Wertleistung zum Bestandesalter A** bestimmt sich als Quotient aus der Wertleistung des Bestandes zum Bestandesalter A und dem Bestandesalter A. Sie ist damit eine vom Bestandesalter abhängige Funktion. Beispielhaft zeigt *Abbildung 1* die Entwicklung der Wertleistung und der durchschnittlichen jährlichen Wertleistung für den Beispielbestand Köpenick 187 (*Tab. 2*).

Der Zielfunktionswert wird schließlich durch das Maximum der durchschnittlichen jährlichen Wertleistung bestimmt.

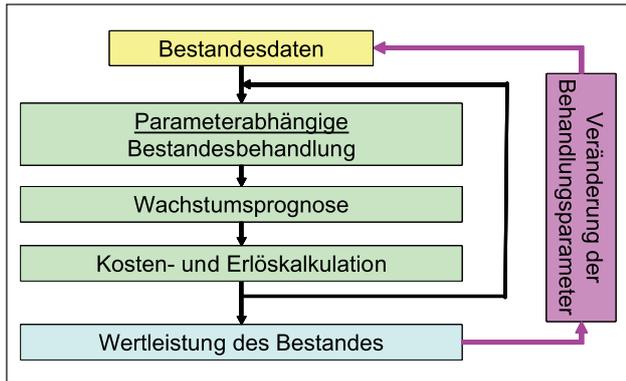


Abb. 2: Der Algorithmus des Simulationsmodells

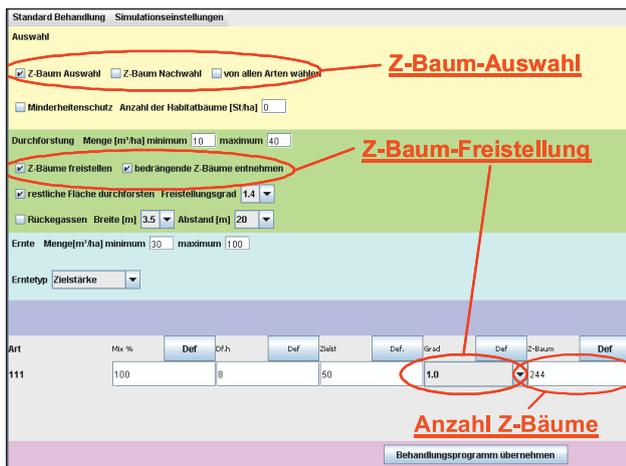


Abb. 3: Parameter zur Steuerung der Z-Baumbehandlung

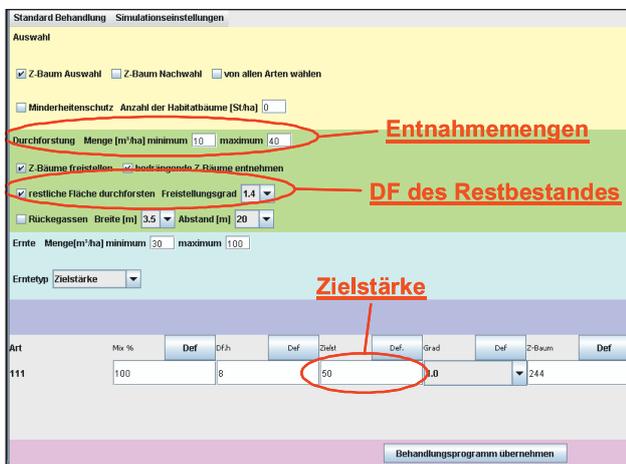


Abb. 4: Parameter zur Beschreibung der Bestandesbehandlung

3. Einsatz von Bestandessimulationsmodellen

Einzelbaumorientierte abstandsabhängige Bestandessimulationsmodelle ermöglichen es, Wachstumsreaktionen von Einzelbäumen auf Durchforstungseingriffe darzustellen und zu analysieren. Mit Hilfe dieser Modelle, hier insbesondere des für Brandenburg parametrisierten Wachstumssimulators BWINPro (NAGEL et al. 2003, DEGENHARDT 2006), lassen sich Bestandesentwicklungen prognostizieren und deren Ergebnisse anhand ertragskundlicher, ökologischer und betriebswirtschaftlicher Parameter vergleichen.

Der dem Programm zugrunde liegende Algorithmus (*Abb. 2*) besteht im Wesentlichen aus drei Teilschritten. Auf der Grundlage der Daten eines Bestandes wird eine Bestandesbehandlung („Parameterabhängige Bestandesbehandlung“) simuliert, das Wachstum für eine vorgegebene Zuwachsperiode prognostiziert („Wachstumsprognose“) und schließlich das Ergebnis basierend auf „Kosten- und Erlöskalkulationen“ analysiert. Nach jeder Wachstumsperiode lässt sich die Wertleistung des Bestandes zum Bestandesalter A berechnen, aus der sich schließlich der Zielfunktionswert, das Maximum der durchschnittlichen jährlichen Wertleistung, ableiten lässt.

Für die Modellierung der „Parameterabhängigen Bestandesbehandlung“ wurde versucht, möglichst viele Strategien der Praxis zu analysieren und diese durch angepasste parameterabhängige Algorithmen zu beschreiben. Im Mittelpunkt standen schließlich Parameter zur Steuerung der Z-Baumbehandlung (*Abb. 3*) sowie der Art und Stärke der Durchforstung des Restbestandes (*Abb. 4*). Zusätzlich wurden weitere Parameter wie das Durchforstungsintervall oder die Zielstärken in das Modell integriert.

Mit Hilfe des Simulationsmodells ist es nun möglich, für diese Parameter iterativ optimale Lösungen zu finden. Für veränderte Parameter werden die resultierenden Maxima der durchschnittlichen jährlichen Wertleistung berechnet und miteinander verglichen.

Beispielhaft kann das Vorgehen anhand eines Kiefernbestandes, dem Versuch Peitz 104 (*Tab. 2*), demonstriert werden. Der Bestand ist von sehr schwacher Bonität (absolute Bonität 15,4 m). Er befindet sich seit 1929 unter Beobachtung. Im Alter von 64 Jahren (1961) und einer Mittelhöhe von 10,75 m wurden die Koordinaten aller Bäume bestimmt sowie die Durchmesser und Höhen gemessen. Diese Bestandesdaten dienen als Eingangsgrößen für die Simulation.

Um das Problem des Findens einer optimalen Behandlungsstrategie auf wenige Parameter zu beschränken, wurde das Durchforstungsintervall auf konstant 5 Jahre und die Zielstärke auf 45 cm festgelegt. Variabel blieben dagegen die Anzahl der Z-Bäume, deren Grad der Freistellung sowie die Durchforstungsstärke des Restbestandes.

Die in *Abbildung 5* dargestellten Diagramme zeigen die maximale durchschnittliche jährliche Wertleistung in Abhängigkeit von Freistellungsgrad der Z-Bäume (x-Achse) und der Durchforstungsstärke des Restbestandes (y-Achse), wobei die Anzahl der ausgewählten Z-Bäume zwischen 0 und 200 variiert. Zunächst fällt auf, dass die höchsten Werte bei relativ geringer Freistellung der Z-Bäume (Freistellungsgrad >1) und relativ geringer Durchforstungsstärke des Restbestandes (>1) erzielt werden. Eine Steigerung der Wertleistung ist ebenfalls bei zunehmender Z-Baumzahl zu beobachten. Bei einer Erhöhung auf 200 Z-Bäume

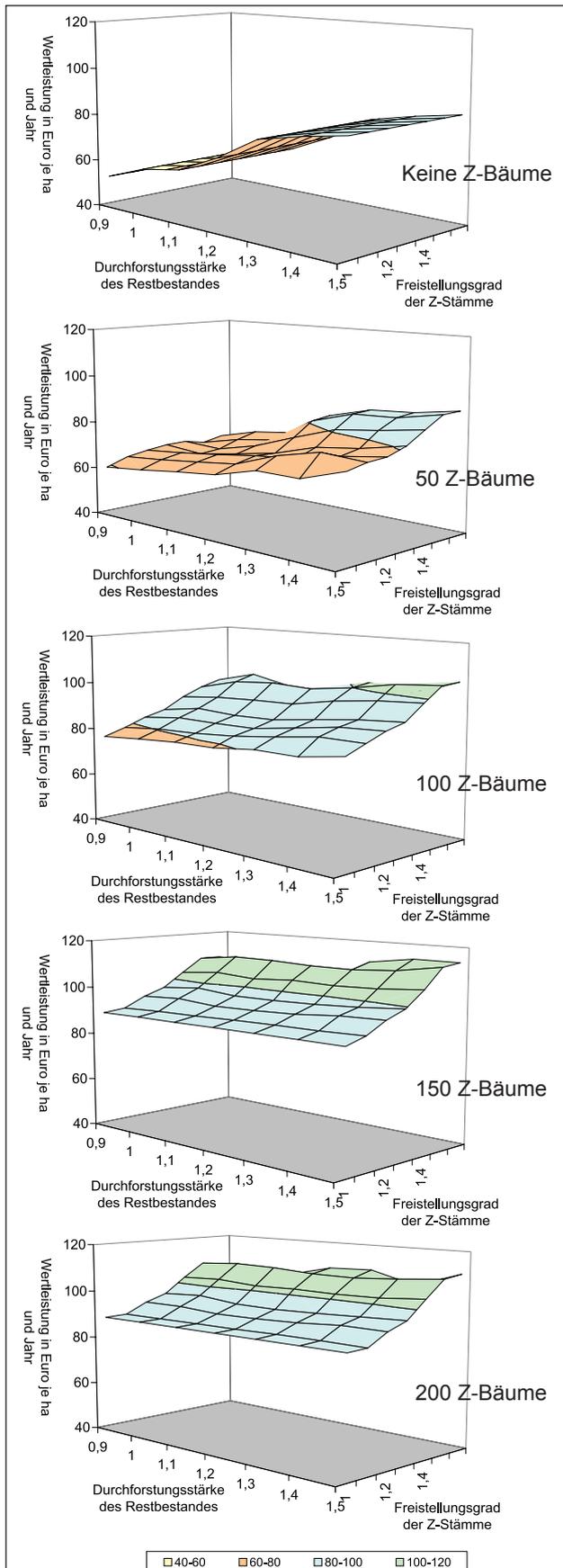


Abb. 5: Maximum der durchschnittlichen jährlichen Wertleistung für den Kiefernbestand Peitz 104 bei Variation der Parameter Anzahl der Z-Bäume, Freistellungsgrad der Z-Bäume und Durchforstungsstärke des Restbestandes

sinkt dann jedoch die Wertleistung des Bestandes wieder. Der zusätzliche Aufwand für die besondere Pflege der Z-Bäume macht sich nun offensichtlich nicht mehr bezahlt.

Ähnliche Ansätze, die sich auf den Einfluss anderer Größen konzentrieren, findet man beispielsweise in DEGENHARDT (2006a) oder DEGENHARDT (2010).

4. Heuristische Verfahrensansätze

Bei der Diskussion der Ergebnisse aus BWINPro traten immer wieder Zweifel auf, ob die Modellalgorithmen die reale Durchforstungspraxis richtig wiedergeben. Dabei wurden Fragen diskutiert, ob die Z-Baum-Auswahl geeignet beschrieben ist, wie sich Bedränger besser definieren lassen oder welchen Einfluss Kronendimensionen auf die Entwicklung der Einzelbäume haben. Immer wieder wurden die Algorithmen angepasst, teilweise neue Daten erhoben und die resultierenden Ergebnisse auf Plausibilität überprüft.

Als Grund für die Abweichungen von den eigentlich zu erwartenden Ergebnissen stellte sich schließlich heraus, dass es häufig sehr verschiedene subjektive Auslegungen für die meist nur verbal beschriebenen Durchforstungsweisen wie Hochdurchforstung, Niederdurchforstung oder Z-Baum-Freistellung gibt. Um die „Parameterabhängige Bestandesbehandlung“ in BWINPro jedoch überschaubar und steuerbar zu gestalten, musste man sich bei der Modellierung der Durchforstungsweisen im Gegensatz dazu auf vergleichsweise einfache, formale Algorithmen mit relativ wenigen Parametern beschränken, so dass man davon ausgehen kann, dass dieser Schritt der Modellierung zu großen Ungenauigkeiten bzw. Informationsverlusten führt. Mit dem folgenden Ansatz soll daher versucht werden, auf diese parameterabhängigen Algorithmen zur Beschreibung der Bestandesbehandlung zu verzichten.

Betrachtet wird dazu die Vorgehensweise bei der Behandlung eines Kiefernbestandes. Nach dem „Grünen Ordner“ erfolgt in der Phase der Läuterung die Auswahl von Z-Bäumen, die auf Grund der zu erfolgenden Astung mit diesem Zeitpunkt auch definitiv festgelegt werden. Außerdem werden diese Z-Bäume durch die Entnahme von Bedrängern begünstigt. Das bedeutet, dass ausgewählte Bäume zu diesem Zeitpunkt entnommen werden, diesen Bäumen also eindeutig ein Zeitpunkt der Entnahme zugeordnet werden kann. Nach Wachstumsperioden von jeweils 5-10 Jahren erfolgen weitere Durchforstungseingriffe, bei denen wiederum Bäume im Sinne der Pflege oder Ernte entnommen werden. Nach Erreichen der Umtriebszeit kann schließlich für jeden Baum des Bestandes genau ein Entnahmezeitpunkt angegeben werden.

Damit lassen sich die Behandlungsstrategien in Beständen anhand der Entnahmezeitpunkte e_i , der $i=1, \dots, N$ Einzelbäume und der konkreten Auswahl von Z-Bäumen z_i ($z_i=1$, wenn Baum i als Z-Baum oder $z_i=0$, wenn Baum i nicht als Z-Baum ausgewählt wurde) darstellen.

Aufbauend auf dieser Idee ergibt sich der folgende Optimierungsansatz für die Ableitung optimaler Behandlungsstrategien: Gesucht sind eine Z-Baum-Auswahl und die Entnahmezeitpunkte für alle Einzelbäume so, dass das beste betriebswirtschaftliche Ergebnis, nämlich die maximale durchschnittliche jährliche Wertleistungen, erzielt wird.

Da die Parameterzahl bei diesem Ansatz durch die Anzahl der Einzelbäume bestimmt wird und damit wesentlich höher als die Zahl der Parameter in den „Parameterabhängigen

Bestandesbehandlungen“ ist, kann das Problem sinnvoll nur mit Hilfe mathematischer Optimierungsverfahren gelöst werden. Andererseits basieren Bestandssimulationsmodelle, insbesondere der für Brandenburg angepasste Wachstumsimulator BWINPro, auf sehr komplexen Algorithmen, so dass sie die Voraussetzungen für die Anwendung von Verfahren der Parameteroptimierung nicht erfüllen. Daher wurde für die Lösung des Problems auf heuristische Verfahren zurückgegriffen (HOOS und STUETZLE 2004).

Heuristische Verfahren sind Techniken zur Suche nach guten (nahezu optimalen) Lösungen für komplexe Optimierungsprobleme in möglichst kurzer Zeit. Prinzipiell sind dabei kaum Kenntnisse über das Verhalten des Systems erforderlich sowie keine Voraussetzungen wie Stetigkeit, Differenzierbarkeit, Konvexität zu erfüllen.

Die Suchverfahren gehen von einer zufälligen oder bekannten Lösung des Problems aus. Iterativ erhält man neue Lösungen, indem von der gerade betrachteten Lösung zufällig oder systematisch einzelne Komponenten des Parametervektors verändert werden. Liefert diese Lösung einen besseren Zielfunktionswert, wird sie akzeptiert. Um den Algorithmus nicht vorzeitig in einem lokalen Maximum enden zu lassen, kann die Lösung mit einer geringen Wahrscheinlichkeit auch bei einer Verschlechterung des Zielfunktionswertes übernommen werden (Simulated Annealing; BLUM und ROLI 2003). Die Suche endet, sobald keine Verbesserung gefunden werden kann.

Für die Ableitung optimaler Behandlungsvarianten in Waldbeständen wird dieser allgemeine Algorithmus wie folgt umgesetzt:

- Für die Anfangslösungen $E_{opt}=(e_1, e_2, \dots, e_N)$, $Z_{opt}=(z_1, z_2, \dots, z_N)$ werden die Entnahmezeitpunkte e_i und Z-Baum-Auswahlen z_i zufällig bestimmt.
- Zu den Anfangslösungen E_0, Z_0 erfolgt die Berechnung des Maximums der durchschnittlichen jährlichen Wertleistung W_0 des Bestandes.
- Für einen zufällig ausgewählten Baum i und zufällig bestimmte Operatoren „+“ oder „-“ wird der Entnahmezeitpunkt dieses Baumes um 5 Jahre erhöht bzw. verringert. Damit ergeben sich für die neue Lösung die Entnahmezeitpunkte $E_{k+1}=E_{opt}+(0,0,\dots,\pm 5,0,\dots,0)$
- Für einen zufällig ausgewählten Baum j wird die Z-Baum-Auswahl geändert.

Baumnummer	Z-Baum	Entnahmealter
1	0	36
2	1	121
3	0	31
4	0	31
5	0	31
6	0	46
7	0	26
8	0	46
9	0	56
10	0	26
...		

Tab. 1: Ergebnisliste des heuristischen Optimierungsverfahrens

- Das Maximum der durchschnittlichen jährlichen Wertleistung W_{k+1} wird für die neuen Lösungen E_{k+1} und Z_{k+1} berechnet.
- Wenn $W_{k+1} > W_k - \Delta$, dann werden $E_{opt}=E_{k+1}$ und $Z_{opt}=Z_{k+1}$ gesetzt. Sonst bleiben $E_{opt}=E_k$ und $Z_{opt}=Z_k$
- Der Algorithmus wird beendet, wenn eine vorgegebene Zahl von Iterationen erfolgte.

Im Ergebnis dieses Suchverfahrens erhält man eine Liste mit optimalen Entnahmezeitpunkten und Z-Baum-Entscheidungen für alle Einzelbäume eines Bestandes (Tab. 1).

4. Durchforsten nach Zahlen-Beispiele

Anhand von drei Kiefernbeständen unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Bonität (Tab. 2) sollen die Ergebnisse der heuristischen Optimierung demonstriert und diskutiert werden. Im jeweiligen Startalter der Simulationen befanden sich die Bestände im Höhenbereich von 10–12 m.

Zunächst sei der Bestand mit der geringsten Bonität, Peitz 104, betrachtet. Die Simulation erfolgt ab einem Alter von 64 Jahre, da ab diesem Zeitpunkt die Koordinaten der Bäume vorlagen. Das Foto (Abb. 6) stammt aus dem Jahr 1989. Leider hat es in diesem Jahr auf der Fläche gebrannt, sodass der Versuch danach nicht weiter beobachtet werden konnte.

Verglichen wurden die mit Hilfe von BWINPro ermittelte optimale Behandlung bei Auswahl von 150 und 200 Z-Bäumen sowie die durch das Verfahren der heuristischen Optimierung ermittelte optimale Behandlungsvariante (Abb. 7). Ganz offensichtlich ist, dass die Z-Bäume des heuristischen Verfahrensansatzes ungleichmäßiger verteilt sind. Durch BWINPro werden durch die Vorgabe von Mindestabständen zwischen den Z-Bäumen Bäume ausgewählt, die insbesondere bei der Variante 200 Z-Bäume nicht die Wertholzdimension erreichen und damit zwar Pflegekosten verursachen aber nicht zum Gewinn beitragen können.



Abb. 6: Versuchsfläche Peitz 104 (Foto: W. NIEFNECKER, 1989)

Fläche	Betrachtete Teilfläche	Startalter (Jahr)	HG zum Startalter	Absolute Bonität	Relative Bonität
Peitz 104	20 m x 20 m	64 (1961)	10,75 m	15,4 m	4,2
Finowtal 198	10 m x 10 m	41 (1981)	11,53 m	25,1 m	1,7
Köpenick 187	12 m x 12 m	21 (1994)	11,02 m	31,6 m	0,1

Tab. 2: Ertragskundliche Charakterisierung der Beispielbestände

Durch das heuristische Verfahren werden dagegen nur Z-Bäume ausgewählt, die die Wertholzdimension erreichen.

Auffällig ist auch, dass diese Z-Bäume im Vergleich zur BWINPro-Variante eher weniger freigestellt werden. Die Optimalvariante aus der heuristischen Optimierung entfernt prinzipiell eher schwächere Bäume. Stärkere Bäume können dagegen auch bei vermeintlicher Konkurrenzwirkung länger im Bestand belassen werden.

Bei einem Alter von 129 Jahren, was etwa der optimalen Umtriebszeit entspricht, werden bei der Behandlung nach Heuristischer Optimierung 155 Euro je ha und Jahr erreicht, dagegen nur 115 EURO für die günstigste Variante aus dem Simulationsmodell, was einer Differenz von fast 25 % entspricht.

Da bis zum Brandereignis 1989 auch noch die Daten des realen Bestandes Peitz 104 vorliegen, ist neben dem Vergleich der drei Simulationsergebnisse auch ein Vergleich mit dem realen Bestand möglich (Abb. 8).

Auffallend ist, dass die in den Simulationen als Z-Bäume ausgewählten Bäume zum größten Teil auch im Originalbestand nach 30 Jahren noch vorzufinden sind, wobei die simulierten Bestände jedoch etwas dichter bestockt scheinen. Während die Simulationen noch relativ viele schwache Bäume im Bestand belassen, zeigen die Durchmesserverteilungen des realen Bestandes und der heuristischen Variante eine relativ gute Übereinstimmung.

Berücksichtigt man, dass bei der heuristischen Optimierung auf jegliche Restriktionen an die Auswahl und Be-

handlung der einzelnen Bäume verzichtet wurde, treffen die Ergebnisse des Modells die reale Entwicklung überraschend gut.

Der Bestand Finowtal 198 wurde als zweites Beispiel ausgewählt (Abb. 9), weil hier die stärksten Bäume sehr ungleichmäßig auf der Fläche verteilt sind.

In diesem Fall weisen die Ergebnisse der heuristischen Optimierung darauf hin, dass trotz ihrer geringen Abstände und der damit vermuteten Konkurrenz, die drei stärksten Bäume als Z-Bäume ausgewählt werden könnten (Abb. 10) (Drei Z-Bäume auf einer Fläche von 10m x 10m entsprechen 300 Z-Bäumen je ha).

Mit BWINPro würde man dagegen andere drei Bäume als Z-Bäume auswählen und mit mehr als 35% unter der optimalen Wertleistung des Bestandes bleiben, da zwei



Abb. 9: Versuchsfläche Finowtal 198 (Foto: G. Lück, 1991)

	64 Jahre	79 Jahre	94 Jahre	109 Jahre	129 Jahre	Wertleistung
BWINPro 200 Z-Bäume						111 Euro
BWINPro 150 Z-Bäume						115 Euro
Heuristische Optimierung						155 Euro

Abb. 7: Peitz 104 - Bestandesentwicklungen der optimalen Lösungen aus BWINPro und der stochastischen lokalen Suche

Realer Bestand 1989 (92 Jahre)	200 Z-Bäume (94 Jahre)	150 Z-Bäume (94 Jahre)	Heuristische Optimierung (94 Jahre)

Abb. 8: Vergleich der Simulationen mit dem realen Bestand



Abb. 11: Versuchsfläche Köpenick 187 (Foto: G. LÜBGE, 1999)

der drei Bäume bei der Umtriebszeit von 106 Jahren nicht die Wertholzdimension erreichen.

Die Auswahl von nur zwei Z-Bäumen führt zu einem ähnlichen Ergebnis (170 ERO je ha und Jahr). Der beste Wert wird mit BWINPro bei der Auswahl nur eines Z-Baumes gefunden. Damit wäre das Potential des Bestandes aber bei weitem nicht ausgeschöpft. Die Ursache für die relativ großen Differenzen liegt hier offensichtlich in der in BWINPro festgelegten Strategie zur Z-Baum-Auswahl.

Als 3. Beispiel wurde mit der Versuchsfläche des Fachteams Waldbau, Köpenick 187, ein Bestand sehr guter Bonität betrachtet (Abb. 11).

Überraschend ist hier die sehr große Zahl an Z-Bäumen, die sowohl im Ergebnis der heuristischen Optimierung als auch bei BWINPro relativ gleichmäßig verteilt sind (Abb. 12). Fünf der sieben ausgewählten Bäume stimmen sogar überein. (Sieben Z-Bäume auf einer Fläche von 12mx 12m entsprechen ca. 500 Z-Bäumen je ha).

Auch nach 30 Jahren sind die Bestände noch sehr ähnlich, da neben den sieben Z-Bäumen nur noch wenige weitere Bäume im Bestand verbleiben.

Bis zum Alter 71 liegt die Behandlungsvariante nach BWINPro mit 795 EURO je ha und Jahr nur ca. 10% unter der Variante aus der heuristischen Optimierung.

Erklärungen hierfür findet man in der sehr guten Bonität des Bestandes. Sehr viele Bäume können die Wertholzdimension von 30cm erreichen und zum guten Ergebnis beitragen. Es ist daher nicht so entscheidend, welcher Baum ausgewählt wird. Bei der großen Zahl der zu begünstigenden Z-Bäume bleiben auch nicht mehr viele Möglichkeiten für die Behandlung des Restbestandes, sodass es auch hier nicht zu großen Unterschieden zwischen den Varianten kommen kann.

Heuristische Optimierung	BWINPro 300 Z-Bäume	BWINPro 200 Z-Bäume	BWINPro 100 Z-Bäume
250 EURO	166 EURO	170 EURO	177 EURO

Abb. 10: Vergleich der optimalen Z-Baumauswahl für den Bestand Finowtal 198

	21 Jahre	51 Jahre	71 Jahre
BWINPro 500 Z-Bäume (795 EURO)			
Heuristische Optimierung (865 EURO)			

Abb. 12: Vergleich der optimalen Behandlungsvarianten für den Bestand Köpenick 187

5. Diskussion

Die Ergebnisse der Suche nach optimalen Behandlungsvarianten mit Hilfe von heuristischen Verfahren zeigen, dass die gefundenen optimalen Lösungen teilweise mit den Ergebnissen aus dem Bestandessimulationsmodell BWINPro und den in der Praxis beschriebenen Durchforstungsweisen übereinstimmen, es aber auch zu bedeutenden Abweichungen kommen kann.

Die größten Differenzen bei der Behandlung der Bestände ergeben sich bei der Auswahl und Pflege der Z-Bäume. Die Ergebnisse der heuristischen Optimierung weisen darauf hin, dass die Abstände zwischen den Z-Bäumen dichter als erwartet gewählt werden können. Außerdem ist auffällig, dass die Z-Bäume eher nur sehr gering freigestellt werden. Da sich die Auswahl auf meist vorherrschende Bäume beschränken sollte, werden diese auf Grund ihrer Dimension nur geringfügig von Nachbarbäumen bedrängt, wachsen daher fast unbeeinträchtigt und setzen sich im Bestand souverän durch. Deren Wuchskraft ist

daher offensichtlich ausreichend, um den Erlösanteil in der Zielfunktion auch ohne besondere Freistellung positiv zu beeinflussen.

Besonders überraschend ist überdies, dass die Ergebnisse der heuristischen Optimierung häufig mehr Z-Bäume auswählen als die Untersuchungen mit BWINPro ergaben und auch der „Grüne Ordner“ (Waldbau-Richtlinien 2004) empfiehlt. Offensichtlich lohnt es sich, jeden Baum bei geeigneter Qualität und unter Beachtung seiner Vitalität als Z-Baum auszuwählen, der in der erwarteten Umtriebszeit die Wertholzdimension erreicht.

Auffällig war aber auch, dass im Gegensatz zu den Empfehlungen des „Grünen Ordners“, sehr schwache Bäume niederdurchforstungsartig relativ zeitig zu entnehmen sind. Diese Strategie resultiert hauptsächlich aus dem sehr ungünstigen Verhältnis zwischen Kosten und Erlösen und dem daraus resultierenden negativen Einfluss auf die Zielfunktionswerte. Die stärkeren Bäume werden dagegen auch bei vermuteter gegenseitiger Konkurrenz auf Grund der zu erwartenden höheren Holzerlöse länger im Bestand belassen.

Untersucht wurde ferner die Abhängigkeit der optimalen Lösungen von den sich verändernden Kosten und Erlösen. Betrachtet wurden dazu die durchschnittlichen Kosten aus den Jahren 2008 und 2011 sowie die Erlöse von 2006 bis 2011. In den Ergebnissen zeigten sich jedoch kaum Unterschiede. Da das Maximum der durchschnittlichen jährlichen Wertleistung wesentlich von der Z-Baum-Auswahl beeinflusst wird, sind nicht die Kosten und Erlöse entscheidend, sondern das Erreichen der Wertholzdimension.

Die hier mit Hilfe von heuristischen Optimierungsverfahren für drei Beispielbestände abgeleiteten Ergebnisse sind sehr schnell und einfach zu bestimmen. Es sind aber zunächst nur Modellrechnungen, damit eher theoretisch und in dieser Form sicherlich noch nicht geeignet, verallgemeinerbare Behandlungsempfehlungen für die Praxis abzuleiten. Die erzielten Ergebnisse liefern jedoch sehr nützliche Anhaltspunkte für das Verständnis des Systems „Wald“, insbesondere der Ursache-Wirkungs-Beziehungen bei der Bewirtschaftung von Waldbeständen.

Zu berücksichtigen ist insbesondere auch, dass die iterativ ermittelten optimalen Behandlungsstrategien in der Praxis nicht in der Exaktheit umgesetzt werden können. Einerseits spielen zusätzliche, bisher nicht im Modell berücksichtigte Parameter wie Qualität, Vitalität oder Bestandesstabilität eine Rolle. Andererseits wirken teilweise unvorhersehbare äußere Einflüsse (Witterung, Sturm, Schädlingsbefall, Schneebruch) auf die Bestandesentwicklung zusätzlich ein. Die tatsächliche Entscheidung muss daher natürlich immer durch den Förster im Wald getroffen werden.

Literatur

- BLUM, C.; ROLI, A. (2003):
Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. *ACM Computing Surveys*, 35 (2003) 3, S. 268–308
- DEGENHARDT, A. (2006):
Der Waldwachstumssimulator „BWINPro Brandenburg“ für die Kiefer in Brandenburg. Landesforstanstalt Eberswalde, Abschlussbericht
- DEGENHARDT, A. (2006a):
Verfahren zur Ableitung optimaler Behandlungsvarianten in Kiefernreinbeständen. *Sektion Forstliche Biometrie und Informatik, Trippstadt*, 25.–27.09.2006, Tagungsbericht, S. 120–128
- DEGENHARDT, A. (2010):
Mit heuristischen Verfahren zur optimalen Durchforstung. *Sektion Forstliche Biometrie und Informatik, Göttingen*, 21.–22.09.2010, Tagungsbericht, im Druck
- HOOS, H. H.; STUETZLE, T. (2004):
Stochastic Local Search – Foundations and Applications. MORGAN KAUFMANN, San Francisco, 2004
- NAGEL, J.; ALBERT, M.; SCHMIDT, M.; DÖBBELER, J. (2003):
BWINPro. Programm zur Bestandesanalyse und Prognose. Handbuch zur Version 6.2, Göttingen Waldbau-Richtlinien 2004 „Grüner Ordner“ der Landesforstverwaltung Brandenburg. Potsdam, Mai 2004