

**Zeitschrift:** Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

**Herausgeber:** Schweizerischer Forstverein

**Band:** 161 (2010)

**Heft:** 9

**Artikel:** Optimierung forstlicher Produktion unter Beachtung von finanziellen Restriktionen

**Autor:** Möhring, Bernhard

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-1097788>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 05.04.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Optimierung forstlicher Produktion unter Beachtung von finanziellen Restriktionen

Bernhard Möhring Abteilung Forstökonomie und Forsteinrichtung, Georg-August-Universität Göttingen (DE)\*

## Optimisation of forest production under financial restrictions

The question of efficiency of resources bound in the silvicultural (biological) production of forest enterprises strikes a central topic of forest management. Using simple spreadsheet calculation models, this paper tries to explicate the relations between silvicultural treatments and economic evaluation criteria under financial restrictions. By means of actual examples, concerning thinning intensity and final harvest age under the restriction of maintenance of capital, practical silvicultural behaviour can be seen as compatible with the optimal economic solutions, determined by the model calculations. This leads to the conclusion that commonly practiced concepts of thinning intensity and productivity dependent harvest age can be interpreted as rational economic behaviour. With reference to such an economic optimum the consequences of changes in forest management, as they are often claimed for instance by directives of nature conservation, water protection etc., can be evaluated based on opportunity costs.

**Keywords:** optimisation of silvicultural production, financial restrictions, Excel calculations  
**doi:** 10.3188/szf.2010.0346

\* Büsingenweg 3, DE-37077 Göttingen, E-Mail bmoehri@gwdg.de

**M**an wird nicht zu weit gehen, wenn man unterstellt, dass die zentrale Herausforderung der Forstbetriebe bei der forstlichen Produktion in der Gestaltung der biologischen Produktionsprozesse liegt. Die Entscheidungen, wann, wo, welche Baumarten angebaut werden und wann, wo, wie viel Holz eingeschlagen wird, bestimmen gleichermaßen sowohl die forstlichen Betriebsleistungen (die Produkte in Form von vermarktbarem Rohholz und die überwiegend nicht marktfähigen Leistungen für Naturschutz, Wasserspende etc.) als auch die Qualitäten und Quantitäten der Waldbestände (den Produktionsapparat). Bäume sind jedoch keine «normalen Produktionsmittel», die genau gesteuert werden können und in überschaubaren Zeiträumen wohldefinierte Produkte erzeugen. Die biologische Produktion in den Forstbetrieben unterliegt vielmehr sehr spezifischen Rahmenbedingungen:

- Bäume und Waldbestände sind Teile dynamischer natürlicher Systeme, biotische Einflussfaktoren wie Sonne, Regen und Standortqualität, aber auch Risiken durch Sturm, Insekten oder Trockenheit bestimmen massgeblich über die biologische Produktion.
- Die forstliche Produktion ist gekennzeichnet durch extreme Langfristigkeit, die mehrere Menschengenerationen (100 Jahre und mehr) umfasst.

- Während ihrer Lebensdauer übernehmen die Bäume die Funktion von Produktionsmitteln. Erst zum Zeitpunkt der Ernte werden Bäume selber zum marktfähigen Produkt.

- Der Zuwachs ist von vielen Faktoren wie beispielsweise Baumart, Standort, Genetik oder Bestandesbehandlung abhängig. Er ist im Verhältnis zum vorhandenen Bestand relativ gering (im Durchschnitt rund 3% des Vorrates) und nimmt nach einer Kulmination mit zunehmendem Alter ab.

- Der Massenzuwachs führt neben der Volumenerhöhung zur Dimensionsvergrößerung der vorhandenen Bäume, was in der Regel positive Auswirkungen auf die erntekostenfreien Holzerlöse je Volumeneinheit hat.

- Bäume sind in ihrem Wachstum nicht unabhängig voneinander. Vielmehr bestimmen die Konkurrenzen um Standortfaktoren wie Licht, Wasser und Nährstoffe das individuelle Baumwachstum. Zudem gibt es Interdependenzen zwischen Bäumen in der Zeit – wo bereits ein Baum wächst, kann in der Regel kein anderer wachsen.

- Menschen verfolgen mit Bäumen beziehungsweise Wäldern sehr unterschiedliche Ziele (Nutz-, Schutz- und Erholungsfunktion), wobei die Rohholzproduktion gemeinhin nur eines von mehreren Zielen ist – häufig noch nicht einmal das wichtigste.

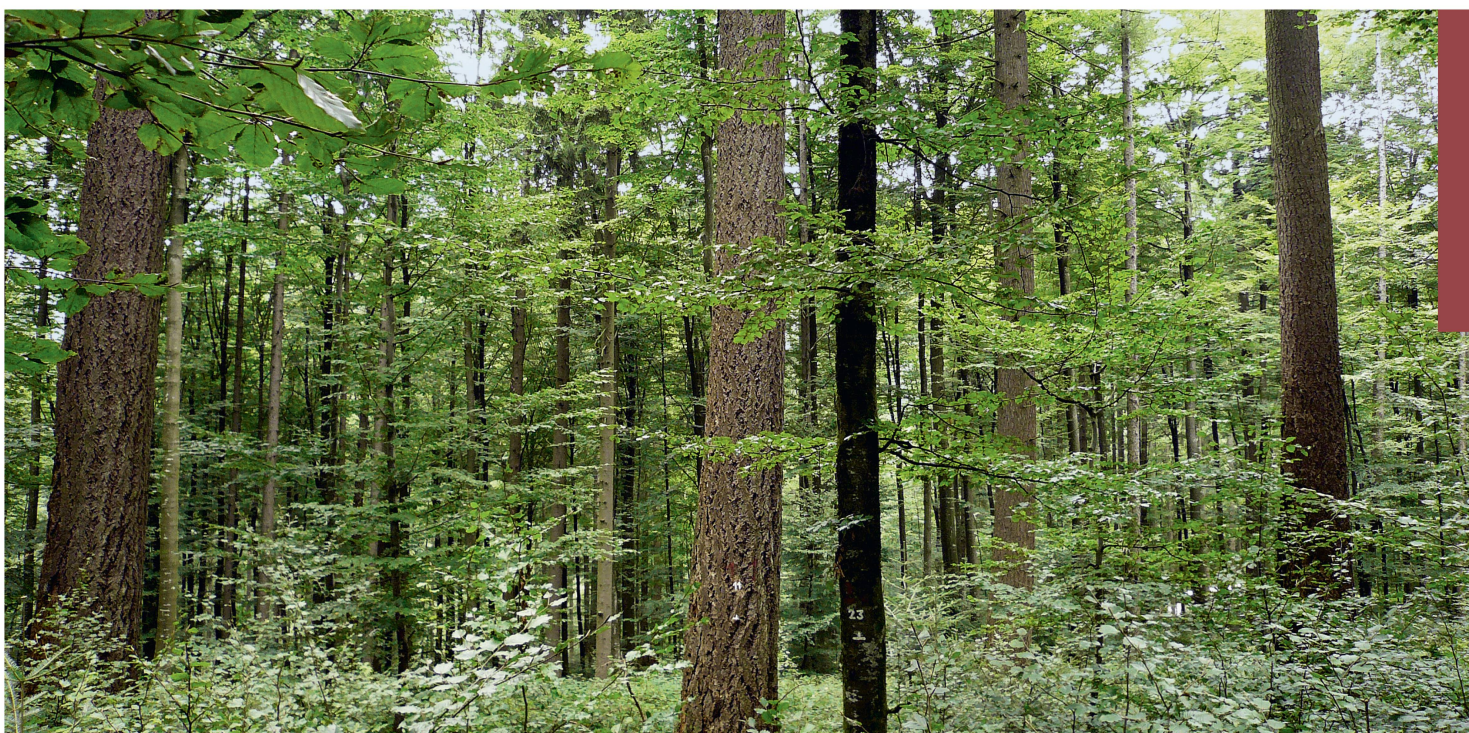


Abb 1 Die biologische Produktion nach Kriterien der Effizienz zu gestalten, ist Anspruch des ökonomischen Prinzips. Foto: Barbara Allgaier Leuch

Dabei unterliegt die forstliche Bewirtschaftung verschiedenen betrieblichen Restriktionen, in deren Zentrum in der Regel die Forderung nach Nachhaltigkeit<sup>1</sup> steht. Für die Holzproduktion bedeutet dies, dass sich Holzeinschlag und Zuwachs die Waage halten müssen, sodass die Substanz erhalten bleibt.

Die biologische Produktion nach Kriterien der Effizienz zu gestalten, mithin verschwenderisches Verhalten zu vermeiden respektive die eingesetzten Ressourcen optimal zu nutzen, ist Anspruch des ökonomischen Prinzips. Zur Umsetzung dieser Forderung werden geeignete Entscheidungsmodelle benötigt, die die naturalbiologischen Produktionszusammenhänge und betriebliche Restriktionen, wie beispielsweise die Verfügbarkeit finanzieller Ressourcen oder die Substanzerhaltung, angemessen abbilden und das Erreichen der verfolgten Ziele optimieren können.

Dieser Beitrag setzt sich zum Ziel, die grundlegenden Zusammenhänge forstlicher Produktionsentscheidungen unter Restriktionen durch einfache, EDV-gestützte Kalkulationsmodelle möglichst leicht nachvollziehbar darzustellen. Dafür muss das Modellsystem die folgenden, für die forstliche Produktion elementaren Grundzusammenhänge (vereinfachend) abbilden:

1. Es muss für Bestände die dynamischen Zusammenhänge von Wachstum und Nutzung abbilden, da während des Bestandeslebens im Rahmen von Durchforstungen unterschiedlich stark in die Bestände eingegriffen werden kann, was wiederum die weitere Volumen- und Wertproduktion beeinflusst.
2. Es muss auch Endnutzungen und die nachfolgende Wiederbegründung von Beständen abbilden

und somit das klassische Problem der Bestimmung der ökonomisch optimalen Umtriebszeit lösen können.

3. Darüber hinaus muss berücksichtigt werden können, dass betriebliche Restriktionen, wie die begrenzte Verfügbarkeit finanzieller Mittel oder die nachhaltige Erhaltung der Substanz, die Entscheidungen und damit das Ergebnis der Zielfunktion massgeblich beeinflussen.

Das im Folgenden beschriebene Modellsystem<sup>2</sup> realisiert diese drei Forderungen mithilfe vergleichsweise einfacher Excel-Tabellenkalkulationen. Es ordnet sich damit methodisch zwischen zwei traditionellen Arten von forstökonomischen Modellen ein:

1. Algebraische Modelle: Sie gehen meist von sehr starken Modellvereinfachungen aus und nutzen dabei in der Regel die abstrakte Sprache der Mathematik. Durch das hohe Mass an Abstraktion und die damit einhergehenden Modellvereinfachungen werden sie oft als unverständlich und in ihren Ergebnissen als für die Praxis wenig relevant empfunden. Ihre Stärke liegt jedoch in der Identifikation von Optimallösungen, die formal bewiesen werden können (Johannson & Löfgren 1985).
2. Waldwachstumssimulationsmodelle: Dabei handelt es sich meist um komplexe EDV-Modellsys-

<sup>1</sup> Die Nachhaltigkeitsforderung umfasst im Sinne einer multifunktionalen Forstwirtschaft üblicherweise das gesamte forstliche Leistungsspektrum inklusive der gesellschaftlichen Dienstleistungen (Speidel 1984). Die Betrachtung soll hier im Weiteren jedoch exemplarisch auf den Bereich der Holzproduktion verengt werden.

<sup>2</sup> Fragen zum Modell und zur Zugänglichkeit können direkt an den Autor (bmoehri@gwdg.de) gerichtet werden.

teme, die auf einer Vielzahl von Funktionen aufbauen. Sie haben die waldwachstumskundliche Produktionsforschung der letzten Jahre stark geprägt. Ihr Haupteinsatzgebiet ist die Entwicklung von realitätsnahen waldbaulichen Szenarien und die Durchführung von regelbasierten Wenn-dann-Analysen (Nagel & Schmidt 2006). Da sie meist jedoch nicht über Optimierungsansätze verfügen, lassen sich mit ihnen keine ökonomischen Optimallösungen identifizieren.

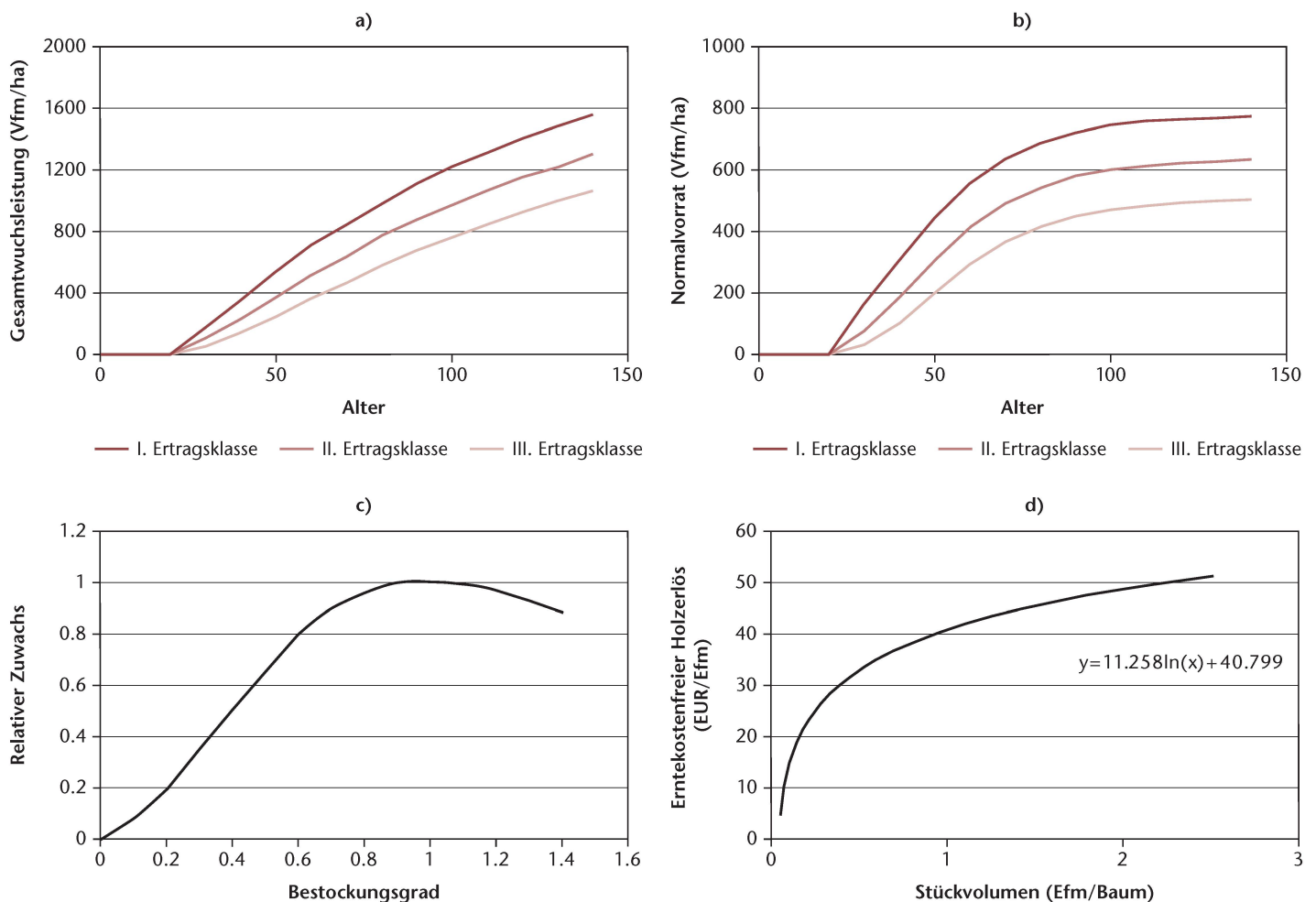
Bei dem hier verfolgten Konzept besteht die grundsätzliche Gefahr, sich zwischen diese zwei etablierten methodischen Stühle zu setzen. Einerseits wird die Allgemeingültigkeit und Eleganz der algebraischen Lösung aufgegeben. So ist keine formale Ableitung, kein Beweis mehr möglich, sondern es können nur beispielhaft die Rechenwege und deren Ergebnisse aufgezeigt werden. Andererseits bleibt die Realitätsnähe durch die stark vereinfachenden Annahmen weiterhin eingeschränkt. Diesen methodischen Gefahren stehen allerdings auch Chancen gegenüber. Die Vorzüge dieses einfachen Modellkonzepts werden insbesondere darin gesehen, dass die Kalkulationen und Modellzusammenhänge vergleichsweise leicht analysiert und durchschaut

werden können. Gerade dies spielt für die forstökonomische Lehre eine wichtige Rolle, da die Studierenden mit Excel als Standardsoftware dieser Modelle vertraut sind.

## Modellbasis

Das hier beschriebene Modellsystem erfüllt vereinfachend die oben genannten Bedingungen für das Beispiel der Fichtenwirtschaft in Norddeutschland, es ist mit anderen Funktionswerten jedoch auch leicht an andere Baumarten anzupassen. Zur Simulation von Zuwachs, Nutzung und Ertrag werden hier vier nicht lineare Funktionen verwendet (Abbildung 2):

a) Zuwachsfunktion (Abbildung 2a): Smaltschinski (2001) hat unter Nutzung von Ertragstafelnden (Wiedemann 1939, zusammengestellt in Schober 1975) das Wachstum (hier Gesamtwuchsleistung) für verschiedene Ertragsklassen mithilfe von Differentialgleichungen erster Ordnung nach Sloboda (1971) beschrieben. Sie werden hier genutzt, um daraus den bonitäts- und altersabhängigen laufenden jährlichen Volumenzuwachs je Hektar abzuleiten.



**Abb 2** Funktionen der Excel-Kalkulationen zur Modellierung von Wachstum und Ernte in Fichtenbeständen: (a) Gesamtwuchsleistung über dem Alter in Abhängigkeit von der Ertragsklasse, (b) Normalvorrat über dem Alter in Abhängigkeit von der Ertragsklasse, (c) bestockungsgradabhängige Zuwachsreduktion, (d) erntekostenfreier Holzerlös für Fichte in Abhängigkeit vom Stückvolumen (Quellen s. Text).

b) Normalvorratsfunktion (Abbildung 2b): Ebenso hat Smaltschinski (2001) auf der Basis von Ertrags- tafeln (Wiedemann 1939, zusammengestellt in Schober 1975) den Normalvorrat bei Bestockungsgrad 1.0 altersabhängig für verschiedene Ertragsklassen dargestellt; diese Angabe bildet die Bezugsbasis für die Zuwachskorrektur bei Bestockungsgraden ungleich 1.0.

c) Zuwachsreduktionsfunktion (Abbildung 2c): Der Einfluss der Durchforstungsstärke auf das weitere Bestandeswachstum (durch den jeweiligen Bestockungsgrad) wird hier vereinfachend durch eine Zuwachsreduktionsfunktion abgebildet. Als Quelle des Funktionsverlaufes wurden die Zuwachsreduktionsfaktoren von Kramer (1990) benutzt. Anhand der Grafik wird erkennbar, dass ein zunehmender Bestockungsgrad zunehmend weniger «effizient» ist – mit steigendem Bestockungsgrad entsteht nur ein unterproportionaler Mehrzuwachs, oberhalb eines Bestockungsgrades von 1.0 sogar ein (hier extrapolierter) Minderzuwachs.<sup>3</sup>

d) Wertfunktion (Abbildung 2d): Dargestellt ist der erntekostenfreie Holzerlös (in EUR/Efm) in Abhängigkeit vom Stückvolumen (in Efm/Baum) als logarithmische Ausgleichsfunktion, die Daten wurden für das Jahr 2006 auf der Basis von Erlös- und Kostendaten der niedersächsischen Landesforstverwaltung für mittlere Verhältnisse mit dem Programm «Holzernte» (FVA 2002) berechnet.

Neben diesen vier Funktionen werden nur wenige weitere Eingangsgrößen und Modellannahmen benötigt:

- Es werden hier für das Rechenbeispiel Bestandesbegründungskosten von 2000 EUR/ha, Bestandespflegekosten im Alter von 10 und 20 Jahren von jeweils 250 EUR/ha und jährliche Fixkosten für Verwaltung, Forstschutz, Wegebau etc. in der Höhe von 83 EUR/ha unterstellt. Alle Erlös- und Kostendaten werden über die Zeit als konstant angenommen.

- Die Stammzahl im Alter von 20 Jahren beträgt 1500 Pflanzen/ha.

- Der Umrechnungsfaktor von Vorratsfestmeter in Erntefestmeter beträgt 0.8.

- Aus modellbedingten Vereinfachungsgründen beträgt in der Simulation der Durchforstungsturnus 10 Jahre (beginnend beim Alter von 20 Jahren). Als Durchforstungsart wird ebenfalls im Sinne der Modellvereinfachung eine schematische Grundflächenabsenkung analog einer Reihen- oder Abstandsdurchforstung unterstellt, bei der das Nutzungsverhältnis zwischen Stammzahl und Vorrat 1:1 beträgt. Sie liegt mit unselektiven Eingriffen damit zwischen Hoch- und Niederdurchforstung.<sup>4</sup> Die Eingriffsstärke im Jahrzehnt ist auf maximal 30% der jeweils vorhandenen Stammzahl begrenzt.

Die obigen Funktionen, Eingangsgrößen und Modellannahmen sind in eine Excel-Kalkulationstabelle integriert. Zentrale Entscheidungsvariablen,

also gestaltbare Größen dieses Modells, sind dabei die Durchforstungsintensität und der Zeitpunkt der Endnutzung. Mithilfe dieses Modells können für verschiedene Umtriebszeiten und Durchforstungsintensitäten (gesteuert durch die prozentuale Entnahmemenge des im jeweiligen Alter vorhandenen Holzvolumens) die naturalen Größen Bestandes- und Stückvolumen sowohl für den verbleibenden als auch für den ausscheidenden Bestand und die damit verbundenen Zahlungsströme ermittelt werden. Darauf aufbauend können dann mithilfe der dynamischen Investitionsrechnungsverfahren ökonomische Kennwerte wie beispielsweise Bodenertragswerte, Annuitäten oder Waldreinerträge berechnet werden, die zur betriebswirtschaftlichen Bewertung der Alternativen dienen.

## Ergebnisse

### Ökonomisch optimale Umtriebszeit

Die Bestimmung der ökonomisch optimalen Umtriebszeit gilt als klassisches Entscheidungsproblem der Forstbetriebe (Buongiorno & Gillies 2003, Froehlich 1997, Klemperer 1996). Unter Nutzung des hier vorgestellten Produktionsmodells können für alternative Umtriebszeiten mithilfe der Formel (1) die Annuitäten (a) berechnet werden, die im forstlichen Sprachgebrauch auch unter dem Begriff der Bodenbruttorenten bekannt sind (Möhring et al 2006):

$$a = \sum_{t=0}^n \frac{(E_t - A_t)}{(1+i)^t} \times \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (1)$$

a: Annuität (Bodenbruttorente)

n: Dauer der Produktionsperiode (Umtriebszeit) in Jahren

t: Zeitpunkt der betrachteten Zahlung (t=0: Zeitpunkt der Bestandesbegründung)

E<sub>t</sub>: Einzahlung zum Zeitpunkt t (z.B. für Durchforstungs- oder Endnutzungserlöse)

A<sub>t</sub>: Auszahlung zum Zeitpunkt t (z.B. für Kulturbegründung, Bestandespflege, Holzernte)

i: Kalkulationszinssatz

Mithilfe eines Variantenstudiums wurden die Annuitäten für voll bestockte Bestände (Bestockungsgrad in jeder Altersstufe 1.0) der Ertragsklasse II bei

<sup>3</sup> Damit werden hier vereinfachend die ertragskundlichen Grundzusammenhänge abgebildet, die Assmann 1961 (in: Kramer 1988) mit den Begriffen maximale, optimale und kritische Grundflächenhaltung beschrieben hat.

<sup>4</sup> Durch die Unterstellung einer schematischen Grundflächenabsenkung bleiben die Stammzahlen des verbleibenden Bestandes relativ hoch, was gleichzeitig bedeutet, dass die Stückvolumina relativ niedrig sind. Modifikationen des Modells, an denen zurzeit gearbeitet wird, ermöglichen in Zukunft hier realitätsnähere Annahmen; an den Grundzusammenhängen dürfte sich dadurch allerdings wenig ändern.

**Tab 1** Variantenstudium der Annuität der Fichtenproduktion (in EUR/[ha × J]) für Ertragsklasse II (Bestockungsgrad 1.0) in Abhängigkeit von Zinssatz und Umtriebszeit.

Umtriebszeit	Zinssatz (%)				
	0	1	2	3	4
50	87	45	7	-28	-60
60	144	84	32	-13	-51
70	185	108	45	-8	-50
80	216	123	50	-7	-52
90	237	132	51	-9	-55
100	252	136	50	-12	-58
110	262	138	48	-15	-60
120	269	138	45	-18	-62
130	273	136	42	-20	-64
140	275	134	39	-22	-65

unterschiedlichen Zinssätzen und Umtriebszeiten berechnet (Tabelle 1). Der Zinssatz kann dabei als ein Mass für die Stärke der Kapitalknappheit aufgefasst werden, wobei ein hoher Zins mithin grosse Kapitalknappheit beziehungsweise attraktive alternative Kapitalverwendungen ausdrückt.

Die ökonomisch optimale Umtriebszeit findet sich bei der Maximierung der Annuität (Möhring et al 2006), wobei die Annuität demjenigen jährlich konstanten Betrag entspricht, der während der Laufzeit (Umtriebszeit) eines Investitionsobjektes unter «Kapitalerhaltung» jährlich als Gewinnbeitrag entnommen werden kann (Schmidt 1986). Die Annuität kann als finanzmathematisch richtig berechneter, jährlich gleicher Deckungsbeitrag der forstlichen Holzproduktion interpretiert werden. Mit steigendem Kalkulationszins mindert sich dieser Betrag und findet sein Maximum bei zunehmend geringerer Umtriebszeit. Dies ist plausibel, da eine Erhöhung des Kalkulationszinssatzes zu einer Erhöhung der Opportunitätskosten des in der Produktion gebundenen Kapitals führt. Dem Ansatz der Maximierung der Annuität entspricht die traditionelle Lösung über die Maximierung des Bodenertragswertes mithilfe

der Faustmann'schen Formel (Möhring et al 2006). Als Vorzug der Annuität wird hier jedoch die Beschränkung der Betrachtung auf nur eine Umtriebszeit angesehen, wohingegen sich die Bodenertragswertformel auf einen unendlichen Zeitraum bezieht.

### Simultane Optimierung von Durchforstungen und Endnutzung

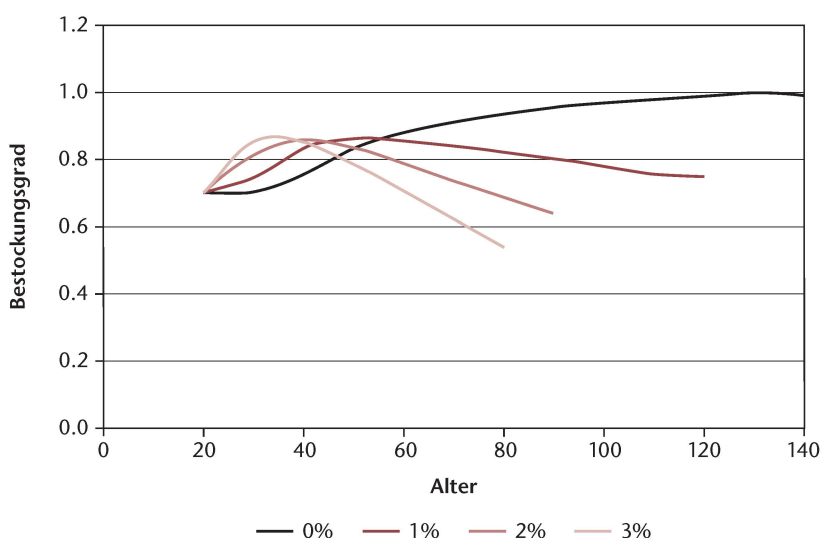
Das Problem zur Bestimmung der optimalen Umtriebszeit diente nur zur einführenden Erläuterung des betriebswirtschaftlichen Bewertungskonzeptes. Das zentrale forstliche Entscheidungsproblem wird hier in der optimalen betrieblichen Nutzungsstrategie, mithin in der parallelen Optimierung von Durchforstungsintensität und Endnutzung gesehen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass sich das Verhältnis zwischen Kapitaleinsatz und Wertzuwachs nicht proportional verhält, vielmehr bewirkt eine Erhöhung des Holzvorrates in der Regel nur eine unterproportionale Steigerung von Zuwachs und Wertbildung; gegebenenfalls führt eine Überbestockung gar zu einem Zuwachsverlust (Abbildung 2c).

Zum Massstab für den betriebswirtschaftlichen Erfolg der forstlichen Produktion wird auch hier wieder die Annuität als jährliche Leistungsgrösse je Hektar berechnet. Mithilfe des in Excel realisierten nicht linearen Optimierungsalgorithmus «MS-Solver» wurden für verschiedene Zinssätze simultan die optimalen Durchforstungsintensitäten und Erntezeitpunkte bestimmt.

Abbildung 3 zeigt die Ergebnisse dieser Excel-Kalkulationen für verschiedene Zinssätze. Dabei sind jeweils die optimierten Bestockungsgrade über dem Alter aufgetragen, die Linien enden im Zeitpunkt der ökonomisch optimalen Umtriebszeit. Anhand dieser Abbildung lassen sich folgende Zusammenhänge erkennen:

Je geringer der Zinssatz (je geringer die Kapitalknappheit),

- desto stärker sind die Eingriffe in der Jugendphase,
- desto höher ist die Vorratshaltung in den Altbeständen,
- desto später wird der Bestand geerntet.



**Abb 3** Finanziell optimale Bestockungsgrade (des verbleibenden Bestands) und Umtriebszeiten für das Fichtenmodell (II. Ertragsklasse) in Abhängigkeit vom Grad der Kapitalknappheit (Zinssatz).

Ein höherer Zinssatz (grössere Kapitalknappheit) führt hingegen zu

- geringeren Eingriffen in der Jugendphase,
- stärkeren Bestockungsgradabsenkungen in den älteren Beständen,
- gepaart mit vergleichsweise frühen Endnutzungen.

Die Ergebnisse der Kalkulationen zeigen wichtige Parallelen mit der waldbaulichen Wirklichkeit. Die im Kleinprivatwald, wo normalerweise ein hohes Mass an Kapitalknappheit unterstellt werden kann, verbreitet vorzufindenden geringen Durchforstungsintensitäten in der Jugendphase in Verbindung mit relativ geringen Umtriebszeiten können so ökonomisch erklärt werden. Auch die Beobachtung, dass Forstbetriebe in den Fichtenaltbeständen meist Unterbestockungen aufweisen (Kramer 1971), findet, vor dem Hintergrund der Kapitalknappheit, ihre ökonomisch-rationale Erklärung (Möhring 2001).

Es ist wichtig, zu erkennen, dass die Modellergebnisse allein Folge der dargestellten vier nicht linearen Funktionen und der erwähnten Inputdaten unter Maximierung einer ökonomischen Zielgrösse sind. Die Modellergebnisse sind nicht durch «waldbauliche» Zielgrössen wie Zielbestockungsgrade oder Zielstärken gesteuert, vielmehr ergeben sich die optimalen Handlungen modellintern allein aus der Maximierung der ökonomischen Zielgrösse Annuität unter Berücksichtigung der Kapitalknappheit, also der Höhe des Kalkulationszinssatzes. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, zu erwähnen, dass sich die Durchforstungsintensitäten und der Zeitpunkt der Endnutzung jeweils dem Punkt annähern, an dem die Grenzrenditen, d.h. das Verhältnis zwischen zusätzlichem Ertrag und zusätzlichem Kapitaleinsatz, mit dem Kalkulationszinsfuss übereinstimmen (vgl. dazu auch Möhring 1994, Wippermann 2005).

## Nutzungsentscheidungen unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeit

Wie bereits erwähnt, soll in diesem Modell auch die Zielsetzung der Nachhaltigkeit als betriebliche Restriktion vereinfachend berücksichtigt werden können. Sie wird hier als Wertnachhaltigkeit im Sinne der Konstanz des Wertes des Holzvorrates interpretiert. Forstbetriebe sind in der Praxis meist keine «ökonomisch offenen Systeme», denen unbegrenzt Kapital zugeführt oder zugunsten anderer Anlagealternativen entzogen werden kann. Der Transfer von Holz in Finanzanlagen ist meist ebenso wenig Teil des Entscheidungsfeldes des forstlichen Managements wie die Beschaffung finanzieller Mittel auf dem Kapitalmarkt zur langfristigen Bindung im Wald. Vielmehr erfordert das zentrale Ziel der Nachhaltigkeit den planmässigen Umgang mit der vorhandenen Substanz im Sinne der «Substanzerhaltung», wodurch formal eine betriebliche Restriktion entsteht.

Um das Problem der innerbetrieblichen Restriktion modellintern berücksichtigen zu können, muss das Entscheidungsproblem um eine Dimension komplexer strukturiert werden. Dazu reicht es nicht mehr aus, nur einen Bestand zu betrachten, sondern es müssen simultan (mindestens) zwei unterschiedlich produktive Betriebsklassen in die Betrachtung einbezogen werden. Als beispielhafte Ausgangssituation wird hier deshalb auf der Basis der oben dargestellten Modellgrundlagen ein Modellforstbetrieb konstruiert, der jeweils auf 100 ha Fläche mit einer einheitlichen Umtriebszeit von 80 Jahren Bestände der I. und der III. Ertragsklasse bewirtschaftet. Als Ausgangssituation seien die Flächen im Sinne des Normalwaldes über die Umtriebszeit gleich verteilt und gemäss Ertragstafel voll bestockt (Abbildung 4).

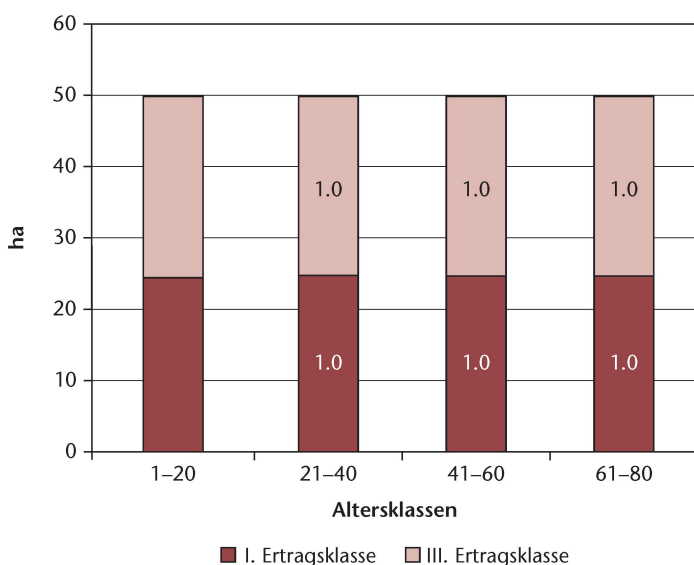


Abb 4 Altersklassenübersicht und jeweiliger Bestockungsgrad (1.0) eines nachhaltig aufgebauten Forstbetriebes aus zwei Betriebsklassen – Ausgangslage.

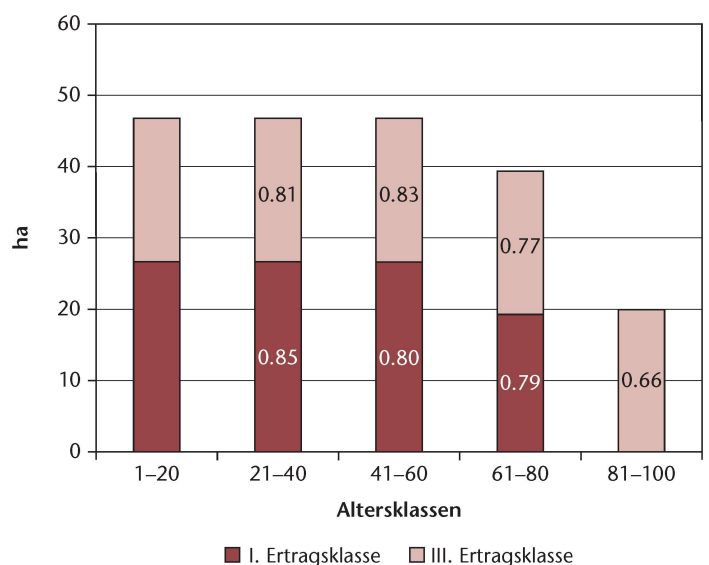


Abb 5 Altersklassenübersicht und jeweiliger Bestockungsgrad (0.85–0.66) eines nachhaltig aufgebauten Forstbetriebes aus zwei Betriebsklassen – optimiert.

Der Modellforstbetrieb erzielt dabei nachhaltig positive Reinerträge. Man könnte also zufrieden sein. Aus ökonomischer Sicht stellt sich allerdings die Frage, ob aus den vorhandenen Ressourcen (bei unveränderter Fläche und ohne in den Beständen insgesamt mehr Kapital zu binden) nicht auch auf Dauer höhere Erträge erzielt werden können, ohne dabei die Nachhaltigkeitsrestriktion zu verletzen.

Auch dieser Frage wurde hier durch eine Optimierung mithilfe des MS-Solver nachgegangen. Ziel dabei war die Maximierung des nachhaltigen Reinertrages unter Beachtung der Kapitalrestriktion (Erhalt des Wertes der Waldbestände) bei Variation der Durchforstungsintensitäten und Endnutzungszeitpunkte in beiden Betriebsklassen. Das Ergebnis des Optimierungsprozesses zeigt vereinfachend Abbildung 5.

Eine simultane Optimierung der Nutzung in beiden Betriebsklassen führt bei Erhaltung des Wertes des Holzvorrates wieder zu höheren Durchforstungsintensitäten mit abgesenkten Bestockungsgraden und zu sich ändernden Umtriebszeiten, wobei das Endnutzungsalter in der I. Ertragsklasse leicht

Die Modellrechnungen führen insgesamt zu einer innerbetrieblich optimalen Kapitalallokation unter Aufrechterhaltung der Wertnachhaltigkeit mit ökonomisch optimierten, d.h. deutlich erhöhten Durchforstungsintensitäten<sup>5</sup> und bonitätsabhängig differenzierten Endnutzungszeitpunkten. So kann der nachhaltige Reinertrag ohne zusätzlichen Kapitaleinsatz um rund 22 EUR/(ha × J), d.h. hier um rund 16%, gesteigert werden.

Auch dieses unter ökonomischer Zielsetzung modellhaft hergeleitete Ergebnis korrespondiert offensichtlich recht gut mit der Praxis der Forstbetriebe. Es werden Bestände auf weniger produktiven Standorten vergleichsweise später geerntet als auf wüchsigen, was die Erntedimensionen bei der Endnutzung annähert und ökonomisch das Konzept der Zielstärkennutzung (Röhrig et al 2006) stützt, welches in Deutschland weit verbreitet ist. Auch zeigen die Modellrechnungen, dass starke Jungdurchforstungen zu positiven Effekten beim betriebswirtschaftlichen Erfolg führen, denn das Modell weist in der Jugendphase deutlich höhere Durchforstungsintensitäten auf als bei Vollbestockung gemäss Ertragstafel. Unter ökonomischen Gesichtspunkten sind auch die verbreitet vorzufindenden stärkeren Eingriffe in Altbestände, die zu Bestockungsgraden deutlich unter 1.0 führen, kein betriebswirtschaftlicher Unfall, obwohl die meisten Baumarten im Alter ihre Fähigkeit verlieren, auf Bestockungsgradabsenkungen mit beschleunigtem Wachstum zu reagieren (Röhrig et al 2006). Vielmehr erweisen sich die Eingriffe unter dem Aspekt der Kapitalknappheit als betriebswirtschaftlich vorteilhaft und können als ökonomisch rationale Reaktion vor dem Hintergrund nachhaltiger Substanzerhaltung angesehen werden.

### Betriebswirtschaftliche Interpretation der Ergebnisse

Unter Effizienzgesichtspunkten ist eine Handlung bei Ressourcenknappheit nur dann auszuwählen, wenn dadurch keine vorteilhaftere verdrängt wird. Bei Kapitalknappheit, wie sie beispielsweise durch die Restriktion einer nachhaltigen Kapitalerhaltung formal in das Modell eingeführt wurde, ist der interne Grenzzinssatz das situativ geeignete Rangordnungskriterium zur Auswahl des optimalen Massnahmenbündels (Möhring 1994). Wichtig dabei ist der innerbetriebliche Vergleich im Sinne der Bildung einer innerbetrieblichen Rangordnung. Entscheidungsrelevant unter der Nachhaltigkeitsrestriktion ist nicht etwa eine explizite Zinsforderung, sondern es ergibt sich vielmehr implizit aufgrund der

		Ausgangslage	Optimiert
<b>Umtriebszeit I./III. Ertragsklasse</b>	Jahre	80/80	74/100
<b>Zustandsdaten</b>			
Gesamtfläche	ha	200	200
Durchschnittsalter	Jahre	40.0	43.7
Holzvorrat gesamt	Vfm/ha	247	218
Abtriebswert gesamt	EUR/ha	5400	5400
<b>Zuwachs und Nutzungen je Jahr</b>			
mittleres Endnutzungsalter	Jahre	80.0	87.2
Holzzuwachs	Vfm/ha	9.7	9.4
Vornutzungen	%	20	37
Endnutzungen	%	80	63
Holzeinschlag gesamt	Efm/ha	7.8	7.5
<b>Kosten und Erlöse</b>			
erntekostenfreier Holzzerlös	EUR/Efm	32.37	36.09
erntekostenfreie Holzzerlöse	EUR/ha	251.69	271.63
Bestandesbegründungskosten	EUR/ha	25.00	23.42
Bestandespflegekosten	EUR/ha	6.25	5.86
Deckungsbeitrag	EUR/ha	220.44	242.35
fixe Hektargemeinkosten	EUR/ha	83.00	83.00
<b>Reinertrag</b>	<b>EUR/ha</b>	<b>137.44</b>	<b>159.35</b>

Tab 2 Ökonomische Zielgrössen eines Forstbetriebes aus zwei Betriebsklassen mit jeweils 100 ha der I. und III. Ertragsklasse vor und nach der Optimierung bei konstantem Wert des Holzvorrates (Wertnachhaltigkeit).

(auf 74 Jahre) reduziert und in der III. Ertragsklasse deutlich (auf 100 Jahre) erhöht wird. Den Einfluss der veränderten Behandlungsstrategien (Durchforstungsintensitäten und Umtriebszeiten in beiden Betriebsklassen) auf die Zustandsdaten und Zuwachs- und Nutzungsdaten des Modellbetriebs bei unverändertem Wert des Holzvorrates (Wertnachhaltigkeit) zeigt Tabelle 2.

<sup>5</sup> Zu den Durchforstungsmassen wurden in den Modellrechnungen nur jene Einschlagsmengen gezählt, die bis zehn Jahre vor dem Endnutzungszeitpunkt anfallen, der Rest wurde zur Endnutzung gezählt. Das erklärt den relativ geringen Durchforstungsanteil bei Bestockungsgrad 1.0.

letzten, innerbetrieblich nicht mehr realisierten Handlungsalternative ein entscheidungsrelevanter «interner Grenzzinssatz». Die Vorgabe der Nachhaltigkeitsrestriktion (Substanzerhaltung) führt mithin zu einer «endogenen Zinsbestimmung» (Hering 2008). In der mitteleuropäischen Forstwirtschaft ist dieser Betrag allerdings naturgegeben relativ gering, in diesem Modellfall liegt dieser Wert bei rund 1.9%.

Solange verschiedene Massnahmen unterschiedliche Grenzzinssätze aufweisen, lohnt sich ein Austausch zwischen den innerbetrieblichen Alternativen. Sind die Grenzzinssätze aller Alternativen allerdings gleich, so ist das ökonomische Optimum erreicht, und eine weitere Verbesserung ist unter den gegebenen Restriktionen nicht mehr möglich.

Bei der Bewertung der Modellergebnisse unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsrestriktion ist es wichtig, dass der zusätzliche ökonomische Erfolg nicht durch zusätzlichen Input wie beispielsweise Einschlagsverzicht oder Erhöhung des Wertes des Holzvorrates erkaufte wird. Vielmehr lassen sich ohne zusätzlichen Einsatz von Kapital oder Fläche auf Dauer bessere Ergebnisse erzielen, weil sich die Einschlagsstrategie an der Produktivität der Bestockung orientiert. Dies führt insgesamt zu einer ökonomisch optimalen Verteilung des Holzvorrates innerhalb des Modellforstbetriebes.

Eine Abweichung von einem solchen ökonomischen Optimum ist zwangsläufig mit einem innerbetrieblichen Nutzenentgang (Kosten) verbunden. In diesem Zusammenhang spricht man üblicherweise von den sogenannten Opportunitätskosten. Bestände beispielsweise die Forderung an den Forstbetrieb, die Umtriebszeiten (z. B. aus Gründen des Natur- oder Wasserschutzes) zu erhöhen, so würde dies – ceteris paribus – nur gelingen, wenn dafür an anderer Stelle vergleichsweise produktiveres Holz vorzeitig eingeschlagen würde. Der durch den vorzeitigen Holzeinschlag entgehende Nutzen stellt Opportunitätskosten der Handlung «Umtriebszeiterhöhung» dar. Eine betriebswirtschaftliche Bewertung derartiger «nicht zielkonformer» Handlungen, von denen es in der forstlichen Praxis im Zusammenhang mit Naturschutz, Wasserschutz oder Landschaftsbild sehr vielfältige geben kann, muss nun versuchen, die jeweils korrespondierenden Opportunitätskosten zu ermitteln. Der Nutzenentgang gegenüber der planmässigen, betriebswirtschaftlich optimalen forstlichen Produktion wird damit zum innerbetrieblichen Bewertungsmaßstab der entsprechenden «nicht zielkonformen» Handlung.

## Wertung der Modellergebnisse

Die vorgestellten Modellkalkulationen sind zwischen traditionellen ökonomischen Analysen auf rein mathematischer Basis und komplexen Wald-

wachstumssimulationen angelegt und verfolgen das Ziel, die Zusammenhänge typischer Entscheidungsfälle der forstlichen Produktion unter betrieblichen Restriktionen zu illustrieren. Die Hauptergebnisse dieser vergleichsweise einfachen Berechnungen weisen eine Vielzahl von Parallelen mit der waldbaulichen und forstbetrieblichen Praxis auf. Sie legen starke Jungdurchforstungen, aber auch deutliche Bestockungsgradabsenkungen in Altbeständen (wie sie verbreitet vorzufinden sind) nahe. Sie empfehlen, wüchsiger Bestände früher zu ernten als weniger wüchsige, und stützen insofern auch das Zieldurchmesserkonzept. Gleichzeitig verdeutlichen sie das innerbetriebliche Disponieren vor dem Hintergrund der betrieblichen Restriktion der Substanzerhaltung.

Unter dem Blickwinkel der praktischen Umsetzung ist wichtig, dass die Modellrechnungen für unterschiedliche Bonitätsniveaus und unterschiedlich mit Ressourcen (Kapital) ausgestattete Forstbetriebe unterschiedliche Behandlungsstrategien nahelegen. Sie unterstützen insofern eine betriebs- und bestandesweise differenzierende Produktionssteuerung und wenden sich gegen formalen Schematismus im Waldbau.

Trotz den durchaus nachvollziehbaren Ergebnissen darf von diesen bewusst einfach strukturierten Modellkalkulationen jedoch nicht die Lösung der komplexen, realen forstlichen Bewertungs- und Entscheidungsprobleme erwartet werden. Die biologisch-ökonomischen Produktionszusammenhänge und die Vielfältigkeit der menschlichen Zielsetzungen können nicht hinreichend durch nur vier nicht lineare Funktionen und wenige Eingangsgrößen beschrieben werden. Dennoch hat eine solch stark vereinfachende modellhafte Annäherung auch Vorteile. Die Beziehungen zwischen der forstlichen Produktion und den ökonomischen Bewertungsmodellen können auf diese vergleichsweise einfache Weise dargestellt werden. Auch sind diese Modelle dazu geeignet, die Richtung der Wirkung von sich ändernden Variablen auf die ökonomischen Ergebnisse aufzuzeigen und jene Konstellationen offenzulegen, unter denen ein formales Optimum zu finden ist.

Darüber hinaus können sie dazu dienen, das betriebswirtschaftliche Bewertungskonzept der Opportunitätskosten zu erläutern, das zum Beispiel bei der Bewertung von Nutzungseinschränkungen im Bereich der Rohholzproduktion (etwa zur Förderung der CO<sub>2</sub>-Speicherung, des Grundwasserschutzes oder der Biodiversität) relevant ist. ■

*Eingereicht: 22. Dezember 2009, akzeptiert (mit Review): 23. April 2010*

## Literatur

BUONGIORNO J, GILLES JK (2003) Decision methods for forest resource management. Amsterdam: Academic Press. 439 p.

- FROELICH FS (1997)** Die Bedeutung der finanziellen Hiebsreife als Kriterium für die forstliche Nutzungsentscheidung. *Forst Holz* 23: 685–689.
- FVA (2002)** Benutzerhandbuch Kalkulationsprogramm Holzerte, Entscheidungshilfe für Holzaufbereitung und -bringung, Holzvermarktung, Controlling und Waldbewertung V6.1 Freiburg: Forstliche Versuchs- Forschungsanstalt Baden-Württemberg.
- HERING T (2008)** Investitionstheorie. München: Oldenbourg, 3 ed. 393 p.
- JOHANSSON PO, LÖFGREN KG (1985)** The economics of forestry and natural resources. Oxford: Blackwell. 292 p.
- KLEMPERER WD (1996)** Forest resource economics and finance. New York: McGraw-Hill. 551 p.
- KRAMER H (1971)** Optimale Wertleistung und vermehrte Industrieholzlieferung bei der Fichtenwirtschaft – ein Widerspruch? *Forst- Holzwirt* 20: 413–415.
- KRAMER H (1988)** Waldwachstumslehre. Hamburg: Paul Parey. 374 p.
- KRAMER H (1990)** Nutzungsplanung in der Forsteinrichtung. Frankfurt a. M.: Sauerländer, 2 ed. 157 p.
- MÖHRING B (1994)** Über ökonomische Kalküle für forstliche Nutzungsentscheidungen. Frankfurt a. M.: Sauerländer, Schriften Forstökonomie 27. 217 p.
- MÖHRING B (2001)** Nachhaltige Forstwirtschaft und Rentabilitätsrechnung – ein Widerspruch? *Allg Forst- Jagdztg* 172: 61–66.
- MÖHRING B, RÜPING U, LEEFKEN G, ZIEGELER M (2006)** Die Anuität – Ein «missing link» der Forstökonomie. *Allg Forst- Jagdztg* 177: 21–29.
- NAGEL J, SCHMIDT M (2006)** The silvicultural decision support system BWINPro. In: Hasenauer H, editor. Sustainable forest management, growth models for Europe. Berlin: Springer. pp. 59–63.
- RÖHRIG E, BARTSCH N, VON LÜPKE B (2006)** Waldbau auf ökologischer Grundlage. Stuttgart: Ulmer, 7 ed. 479 p.
- SCHMIDT RH (1986)** Grundzüge der Investitions- und Finanzierungstheorie. Wiesbaden: Gabler, 2 ed. 288 p.
- SCHOBER R (1975)** Ertragstabeln wichtiger Baumarten bei verschiedener Durchforstung. Frankfurt a. M.: Sauerländer. 154 p.
- SLOBODA B (1971)** Zur Darstellung von Wachstumsprozessen mit Hilfe von Differenzialgleichungen erster Ordnung. Freiburg i. Br.: Mitt Baden-Württ forstl Versuchsanstalt 32. 109 p.
- SMALTSCHINSKI T (2001)** Regionale Waldwachstumsprognose. Freiburg i. Br.: Albert-Ludwigs-Univ, Schr.reihe Freibg forstl Forsch 12. 121 p.
- SPEIDEL G (1984)** Forstliche Betriebswirtschaftslehre. Hamburg: Paul Parey, 2 ed. 226 p.
- WIPPERMANN C (2005)** Ökonomische Optimierung von Durchforstungen und Umtriebszeit – eine modellgestützte Analyse am Beispiel der Kiefer. Frankfurt a. M.: Sauerländer, Schriften Forstökonomie 30. 131 p.

## Optimierung forstlicher Produktion unter Beachtung von finanziellen Restriktionen

Die Frage der Effizienz, also der rationale Umgang mit begrenzten Mitteln in der biologischen Produktion, ist eine zentrale Herausforderung der forstlichen Wissenschaft und Praxis. Dieser Beitrag versucht, auf vereinfachendem Wege anhand von Modellkalkulationen die Zusammenhänge zwischen waldbaulichem Handeln und ökonomischen Entscheidungskriterien unter Restriktionen aufzuzeigen. Es wird so ein Schritt getan, die ökonomischen Zusammenhänge transparent und nachvollziehbar darzustellen und der Bewertung zugänglich zu machen. Die stark vereinfachenden forstlichen Produktionsmodelle zeigen, dass unter der Restriktion einer nachhaltigen Kapitalerhaltung die ökonomischen Entscheidungsregeln bezüglich der Durchforstungsintensitäten und Endnutzungszeitpunkte zu starken Durchforstungen im Jungwald, Bestockungsgradabsenkungen in den Altbeständen und einer bonitätsabhängigen Differenzierung der Umtriebszeiten führen. Diese Resultate stehen in Übereinstimmung mit der forstlichen Praxis. Unter Bezug auf derartige ökonomische Optima können dann Handlungsabweichungen, wie sie beispielsweise im Zusammenhang mit Schutzgebietsauflagen oder dem Vertragsnaturschutz vermehrt gefordert werden, betriebswirtschaftlich bewertet werden.

## Optimisation de la production forestière dans des conditions de restriction financière

L'efficience, autrement dit la gestion rationnelle de ressources limitées, est une question centrale de la production biologique posée à la recherche et à la pratique. Cette contribution s'attache, à l'aide de modèles de calcul, à montrer de façon simplifiée le rapport existant entre les mesures sylvicoles et les critères d'évaluation économique dans des conditions de restriction financière. Cette démarche vise ainsi à présenter les interrelations économiques de façon transparente et compréhensible afin de permettre une évaluation. Dans les limites imposées par la conservation durable du capital, les modèles de production forestière, fortement simplifiés, confirment la rationalité économique des démarches de la pratique en matière d'intensité des éclaircies et de calendrier des coupes définitives (fortes éclaircies dans les jeunes peuplements, réduction du degré de couverture dans les vieux peuplements et variabilité de la période de rotation en fonction de l'indice de fertilité). Sur la base de tels optima économiques, l'entreprise peut évaluer les coûts engendrés par des modifications de la gestion à l'instar de ce qui est exigé par exemple dans des zones de protection de l'eau potable ou pour des contrats de protection de la nature.