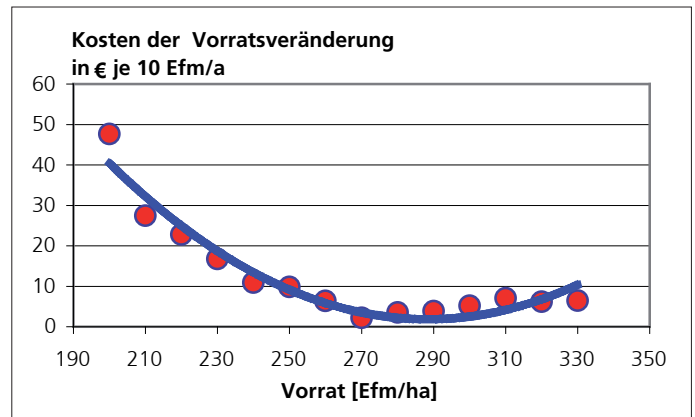


„Durchforsten“ und „Ernten“ zu einzelnen Modellbeständen und Zeitperioden vorgenommen. Dabei kann man sich neben spezialisierter auch gängiger Software wie Excel bedienen, bei dem der „Simplex“-Algorithmus zur Lösung Linearer Optimierungsprobleme zugeschaltet werden kann (AddIn). Die Vorräte, Erlöse, Kosten und Restriktionen wurden hierzu in ein Excel-tableau (Abb. 2) eingegeben.

### Aktueller Vorrat zu hoch oder zu niedrig?

Dem Ausgangsszenario wurde eine Restriktion in Form eines Höchst- und Mindestvorrats hinzugefügt. Der einzuhalten Vorrat wurde dann in Schritten von 10 Efm/ha verändert. Das Ergebnis der Zielfunktion ändert sich dadurch schrittweise. Diese Kosten der Vorratshaltungen lassen sich grafisch darstellen (Abbildung 3). Der optimale Vorrat liegt unter den gegebenen Annahmen zu Waldwachstum, Erlösen und vor allem den eingesetzten Restriktionen

Abb. 3:  
Opportunitätskosten  
des Vorrats



zwischen 275 und 300 Efm/ha. Der aktuelle Holzvorrat im untersuchten Betriebsteil beträgt 315 Efm/ha, woraus sich eine zusätzliche Nutzungsmenge ergibt [4, 2]

Die Arbeit hat gezeigt, dass die lineare Programmierung für Planungsprobleme in Forstbetrieben eingesetzt werden kann und wertvolle Entscheidungshilfen für die Betriebsleitung bietet.

#### Literaturhinweise:

[1] DANTZIG, G. B.; THAPA, M. N. (1997): Linear Programming. 1. Introduction. Springer, New York. [2] DIRSCH, R.; KNOKE, T. (im Druck): Zur finanziellen Analyse der Höhe des Holzvorrates: eine Anwendung der Linearen Programmierung im Rahmen der Forstbetriebsplanung. Allg. Forst- und Jagdzeitung. [3] DUERR, W. A.; BOND, W. E. (1952): Optimum Stocking of a Selection Forest. Journal of Forestry 50, S. 12-16. [4] ESSER, R. (2005): Zur Optimierung des betrieblichen Holzvorrats: Eine Studie am Beispiel des Gräflich Arco Zinneberg'schen Forstbetriebs in Tschechien. Diplomarbeit. TU München. [5] PRETZSCH, H.; BIBER, P.; DURSKÝ, J. (2002): The Single Tree-based Stand Simulator SILVA: Construction, Application and Evaluation. Forest Ecology and Management 162, S. 3-21.

# Forstbetriebsplanung unterstützen durch lineare Programmierung

Von Bernhard Felbermeier, Thomas Knoke und Reinhard Mosandl, Freising

*Die Forstbetriebsplanung steht regelmäßig vor der Aufgabe, das räumliche Gefüge der Waldnutzung im Forstbetrieb zu ordnen und an die Ziele des Waldbesitzers anzupassen. Mithilfe der linearen Programmierung kann dieser Prozess unterstützt werden. Am Beispiel eines virtuellen Forstbetriebes wird gezeigt, welche Konsequenzen sich für den nachhaltigen Hiebssatz und den Ertragswert bei einer finanziellen Optimierung ergeben.*

## Optimierungsverfahren

werden weltweit in der Forstbetriebs- und Ressourcenplanung erfolgreich eingesetzt [1, 3, 4, 5, 9, 10, 11] und können auf die Verhältnisse in Deutschland übertragen

B. Felbermeier ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Waldinventur und nachhaltige Nutzung und am Lehrstuhl für Waldbau der Technischen Universität München (TUM). Prof. T. Knoke ist Leiter des Fachgebietes für Waldinventur und nachhaltige Nutzung und betreut das Projekt. Prof. R. Mosandl ist Inhaber des Lehrstuhls für Waldbau an der TUM.

werden [6]. Das Verfahren verläuft in zwei Arbeitsschritten:

- Zuerst wird ein zentrales Betriebsziel – z.B. die Maximierung des Ertragswertes – mithilfe einer so genannten Zielfunktion modelliert. Das Maximum dieser Zielfunktion wird bestimmt. Unter den gegebenen Produktions- und Marktbedingungen kann so diejenige Vorgehensweise ermittelt werden, bei welcher z.B. der maximale Ertragswert erreicht wird.
- Die Erfahrung zeigt, dass die alleinige Ausrichtung der Planung auf ein Betriebsziel zu unerwünschten Nebeneffekten führt. Deshalb

wird in einem zweiten Schritt der Definitionsbereich der Zielfunktion durch Nebenbedingungen eingeschränkt. So kann z.B. festgelegt werden, dass der Hiebssatz nicht unter ein bestimmtes Niveau fallen darf, um einen Mindestdeckungsbeitrag und die Auslastung betriebseigenen Personals sicherzustellen. Auch ökologische Gesichtspunkte lassen sich so in die Betriebsplanung integrieren. Diese Restriktionen bewirken also, dass bei der Optimierung der Zielfunktion nur Maxima berücksichtigt werden, welche die Nebenbedingungen auch erfüllen.

## Anwendungsbeispiel

Das derzeit am Wissenschaftszentrum Weihenstephan in Entwicklung befindliche Verfahren wird am Beispiel eines virtuellen Forstbetriebes demonstriert. Der simulierte Forstbetrieb ist fichtendominiert mit einem Überhang der Alterklassen IV und V. Die Wuchsverhältnisse sind gut, die angenommene Holzbodenfläche beträgt 15 000 ha.

Betriebsrisiken sind im hier vorgestellten Beispiel noch nicht berücksichtigt, werden aber im Rahmen der laufenden Untersuchungen in das Optimierungsverfahren einbezogen.

Für die Optimierung wurden folgende betriebliche Kennziffern berechnet:

- a) Die Naturaldaten von 226 Bestandstypen (Straten) wurden mithilfe des Waldwachstumssimulators SILVA 2.1 vom Lehrstuhl für Waldwachstumskunde der TU München über einen Planungszeitraum von 30 Jahren (6 Perioden zu 5 Jahren) simuliert (Methodik siehe [8]).
- b) Die simulierten Naturaldaten wurden mithilfe des Sortierungsmodells BDATpro [7] entsprechend den ortsüblichen Vorgaben sortiert und zu Marktpreisen bewertet.
- c) Die Aufarbeitungskosten der daraus resultierenden Sortimente wurden aus Durchschnittspreisen und Tarifen ermittelt.

Als zentrales Betriebsziel wurde die Maximierung des Ertragswertes formuliert (Zielfunktion s. Kasten).

Als Nebenbedingungen wurden folgende Varianten festgelegt, wobei jeweils unterstellt wurde, dass im Rahmen des betrieblichen Umbauprogramms durchschnittlich ein Viertel der Abnutzungsfläche künstlich mit Laubholz verjüngt wird und der Kalkulationszinssatz 3 % beträgt:

- a) Referenzvariante: Der Hiebssatz wird entsprechend der üblichen Naturalplanung durch die Simulationsergebnisse des Waldwachstumsmodells festgesetzt. Ein Viertel der Abnutzungsfläche wird künstlich mit Laubholz verjüngt.
- b) Gewinnmaximierungsvariante KJV (Kunstverjüngung): Der Hiebssatz wird entsprechend der Zielfunktion ohne Beachtung des Naturverjüngungsfortschritts optimiert. Die gesamte Abnutzungsfläche wird künstlich verjüngt und setzt sich aus ¼ Laubholzkultur und ¾ Nadelholzkultur zusammen.
- c) Gewinnmaximierungsvariante NVJ (Naturverjüngung): Der Hiebssatz wird entsprechend der Zielfunktion unter Beachtung des Verjüngungsfortschritts und der Nutzung von Naturverjüngungspotenzialen optimiert. Ein Viertel der Abnutzungsfläche wird künstlich mit Laubholz verjüngt.
- d) Einschlagskorridorvariante: Entsprechend der Variante c mit der Einschränkung, dass der Hiebssatz mindestens 5 Efm/ha und maximal 15 Efm/ha betragen darf.

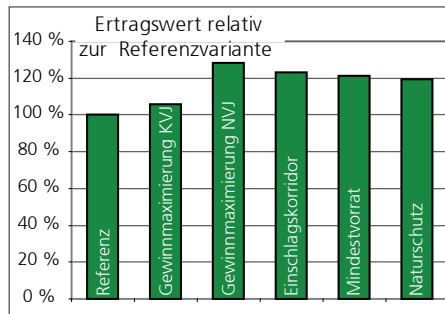


Abb. 1: Vergleich des Ertragswerts der verschiedenen Varianten

- e) Mindestvorratsvariante: Entsprechend Variante d mit der Einschränkung, dass der durchschnittliche Vorrat von 230 Efm/ha nicht unterschritten werden darf.
- f) Naturschutzvariante: Entsprechend Variante e mit der Einschränkung, dass 5 % der Fläche in naturschutzrelevanten Bereichen stillgelegt wird.

Die Zielfunktion und die Nebenbedingungen lassen sich durch lineare Gleichungen beschreiben, sodass für die Optimierung das Simplex-Verfahren der linearen Programmierung eingesetzt werden konnte [2]. Die Berechnungen erfolgten durch eine Optimierungssoftware der Firma Lindo Systems. Für die Bedienung des Systems wurde eine grafische Nutzeroberfläche erstellt, auf welcher die Betriebsleistung Nebenbedingungen festlegen kann. Die Rechenzeit für eine Variante lag bei maximal drei Minuten.

Für jede der Varianten wurde eine Optimierung durchgeführt, deren Ergebnisse nachfolgend dargestellt werden:

Vergleicht man die Ertragswerte der Referenzvariante (a) und der optimierten Varianten (b bis f), so ist festzustellen, dass alle optimierten Varianten zu einem höheren Ertragswert führen (Abb. 1). Der Grund hierfür liegt darin, dass die zeitliche und räumliche Optimierung der Einschlagsplanung einen höheren Hiebssatz zu Beginn der Planungsperiode erlaubt. Dies kann als Hinweis gewertet werden, dass eine Vielzahl der Waldbestände unter finanziellen Gesichtspunkten hiebsreif sind. Die Nutzung dieser Bestände ist finanziell und aufgrund des Verjüngungsgebots auch ökologisch nachhaltig, allerdings mit der

Einschränkung, dass Betriebsrisiken bislang nicht berücksichtigt wurden.

Bei den optimierten Varianten erweist sich die Berücksichtigung des Naturverjüngungspotenzials als entscheidend für die Höhe des Ertragswertes. Während die Gewinnmaximierung ohne Berücksichtigung des Naturverjüngungspotenzials (Variante b) den Wertgewinn aus der verbesserten Hiebssatzplanung weitgehend für Kunstverjüngungsmaßnahmen aufbraucht, ermöglicht die Berücksichtigung des Naturverjüngungspotenzials (Varianten c bis f) eine deutliche Steigerung des Ertragswertes. Diese überwiegt dabei auch die finanziellen Effekte aller anderen Nebenbedingungen, die aus ökologischen und sozialen Gesichtspunkten die Hiebssatzentwicklung stabilisieren (Variante d), Mindestvorräte erhalten (Variante e) oder die vorhandenen wenig wertvollen Laubholztalbestände erhalten (Variante f).

## Folgerungen

Das Beispiel zeigt, dass die Optimierung des Hiebssatzes in der Betriebsplanung mitteleuropäischer Forstbetriebe angewendet werden kann. Es konnte demonstriert werden, dass im virtuellen Beispielbetrieb die Optimierung gegenüber der rein naturalen Planung Wertschöpfungspotenziale aufzeigt. Insbesondere die Berücksichtigung des Naturverjüngungspotenzials spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Die Rücksichtnahme auf ökologische und soziale Aspekte war im Beispielbetrieb ohne wesentliche finanzielle Einbußen möglich.

### Literaturhinweise:

[1] BARE, B. B.; OPALACH, D. (1988): Notes: Determining Investment-Efficient Diameter Distributions for Uneven-Aged Northern Hardwoods. *Forest Science* 34, S. 243-249. [2] DANTZIG, G. B. (1951): Application of the Simplex Method to a Transportation Problem. In: Koopmans, T.C. (Ed.), *Activity Analysis of Production and Allocation*. Wiley, New York, S. 359-373. [3] FARRELL, R. R.; MANESS, T. C. (2005): A Relational Database Approach to a Linear Programming-based Decision Support System for Production Planning in Secondary Wood Product Manufacturing. *Decision Support Systems* 40, S. 183-196. [4] GUSTAFSON, E. J.; ROBERTS, L. J.; LEEFERS, L. A. (2006): Linking Linear Programming and Spatial Simulation Models to Predict Landscape Effects of Forest Management Alternatives. *Journal of Environmental Management* 81, S. 339-350. [5] HOGANSON, H. M.; ROSE, D. W. (1984): A Simulation Approach for Optimal Timber Management Scheduling. *Forest Science* 30, S. 220-238. [6] KNOKE, T.; MOSANDL, R. (2004): Integration ökonomischer, ökologischer und sozialer Ansprüche: Zur Sicherung einer umfassenden Nachhaltigkeit im Zuge der Forstbetriebsplanung. *Forst und Holz* 59, S. 535-539. [7] KUBLIN, E. (2003): Einheitliche Beschreibung der Schaffform – Methoden und Programme – BDATpro. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 122, S. 183-200. [8] MOSHAMMER, R. (2006): Vom Inventurpunkt zum Forstbetrieb. *AFZ-DerWald*, S. 1164-1165. [9] Öhman, K.; Eriksson, L. O. (2002): Allowing for spatial consideration in long-term forest planning by linking linear programming with simulated annealing. *Forest Ecology and Management* 161, S. 221-230. [10] TEEGUARDEN, D. E.; SPERBER, H. L. v. (1968); *Scheduling Douglas-Fir Reforestation Investments: A Comparison of Methods*. *Forest Science* 14, S. 354-368. [11] VALSTA, L. (1993): *Stand Management Optimization Based on Growth Simulators*. Finnish Forest Research Institute. Research Papers. 1-51.

$$\text{max: Ertragswert} = \sum_{\text{Stratum}=1}^{226} \sum_{\text{Periode}=1}^6 \frac{\text{db}_{\text{Stratum, Periode}} \cdot f_{\text{Stratum, Periode}}}{(1+r)^t} + \sum_{\text{Stratum}=1}^{226} \frac{A_{\text{Stratum}} \cdot F_{\text{Stratum}}}{(1+r)^T}$$

db = Deckungsbeitrag (um die Ernteaufgaben und Verwaltungskosten bereinigte Holzerlöse, Kultur- und Jungwuchspflegeausgaben als negative Werte)  
A = Abtriebswert am Ende des Planungszeitraumes  
F = Stratumfläche am Ende des Planungszeitraumes  
T = Planungszeitraum  
f = Nutzungsfläche  
r = Zinssatz  
t = Eingriffszeitpunkt