

# Zur Optimierung des Holzvorrates im Stiftungswald der Ludwig-Maximilians-Universität München

Thomas Knoke

Fachgebiet für Waldinventur und Forstbetriebsplanung

Technische Universität München, Am Hochanger 13, 85354 Freising, Deutschland

## 1 Einleitung

Die unmittelbaren Nutzungsmöglichkeiten in einem Forstbetrieb hängen stark von der aktuellen Vorratshöhe ab. Hohe Vorräte gehen dabei immer mit hohen aktuellen Nutzungsmöglichkeiten einher. Das Aufbauen solcher Vorräte erfordert jedoch Nutzungsverzichte, das Halten bindet meist erhebliche Geldmittel und verursacht Kapitalkosten. Bei der Planung bestimmter Vorratshöhen im Rahmen der Forsteinrichtung, also bei der Festlegung von sogenannten „Zielvorräten“, werden Kapitalkosten in Mitteleuropa i.d.R. außer Acht gelassen.

Auch die Aufstockung des Holzvorrates im Stiftungswald der Ludwig-Maximilians-Universität München (im Folgenden Universitätswald), der im Jahre 1990 rund 330 Efm/ha betrug, auf 385 Efm/ha im Jahre 2002 war nur möglich, indem auf einen Teil der aufgrund des Volumenzuwachses möglichen Nutzungen verzichtet wurde (vgl. hierzu auch Möhring, 1997). Betrachten wir einen solchen Nutzungsverzicht, so wird schnell klar, welche Konsequenzen er hat. Denn mit Blick auf die Kasse des Waldbesitzers macht es keinen Unterschied, ob Geld ausgegeben oder nicht eingenommen wird: Beides schmälert den Bestand an Zahlungsmitteln. Ein Ansatz zur Optimierung der Vorratshöhe hebt deshalb ab auf den Vergleich des Nutzungsverzichtes, der notwendig ist, um einen bestimmten Holzvorrat zu erreichen mit den dadurch möglicherweise gewonnenen Vorteilen. Hierzu können zählen: Eine Steigerung des Wertzuwachses aufgrund steigender Holzpreise und sinkender Ernteausgaben sowie geringer werdende Kultur- und Pflegeausgaben.

Die grob skizzierte Abwägung entspricht dem Kalkül eines seit einiger Zeit unter dem Stichwort „Fischereimodell“ auch in der deutschsprachigen forstökonomischen Literatur diskutierten Optimierungsansatzes (vgl. z.B. Borchert, 2001; Deegen, 2002). Im Gegensatz zum berühmten „Faustmann-Modell“, welches den Wirtschaftler in die Lage versetzt, die Holzproduktion eines einzelnen Bestandes hinsichtlich der Produktionszeit zu optimieren, hebt das „Fischereimodell“ auf die Optimierung der Dichte des Bestandes einer natürlichen Ressource ab (z.B. einer Fischpopulation). Der Vorteil des zuletzt genannten Modells besteht darin, dass Interaktionen der Waldbäume aber auch Wechselwirkungen zwischen den Beständen implizit berücksichtigt werden. Solche Wechselwirkungen werden durch das „Faustmann-Modell“, das auf die Optimierung des Erntezeitpunktes eines einzelnen Baumes oder Bestandes zielt, nicht abgebildet (Oderwald und Duerr, 1990; Deegen, 2002). Als Nachteil des „Fischereimodells“ führt Deegen aber an, dass die Altersabhängigkeit des Wertzuwachses ignoriert werde. Zudem verläuft nach Borchert (2001) die Anpassung des Holzvorrates an die gewünschte Höhe nicht optimal.

Die Optimierung des Überganges von der aktuellen zur gewünschten, weil „optimalen“ Vorratshöhe ist noch weitgehend offen. Gerade dieser Punkt erscheint aber wichtig. Im vorliegenden Beitrag wird deshalb ein pragmatischer Ansatz getestet, indem zunächst mit Hilfe des „Fischereimodells“ statische Berechnungen zur optimalen Vorratshöhe durchgeführt werden. Dann wird in einem zweiten Schritt versucht, basierend auf der Technik der linearen Programmierung, also mit Hilfe eines dynamischen Optimierungsverfahrens, einen optimalen Weg zur angestrebten Vorratshöhe aufzuzeigen.

Zur besseren Strukturierung orientiert sich der Beitrag an den folgenden Fragestellungen:

- 1) Existiert im Universitätswald eine Beziehung zwischen der durchschnittlichen Höhe des Holzvorrates und dem durchschnittlichen Wertzuwachs?
- 2) Lässt sich eine solche Beziehung zur Ableitung einer „optimalen“ Vorratshöhe nutzen?
- 3) Wird die statisch abgeleitete Vorratshöhe bei Berücksichtigung der Übergangsphase (von aktuellem zu angestrebtem Holzvorrat) bestätigt?

Der Universitätswald Landshut wurde als Beispielbetrieb aufgegriffen, weil hier im Jahre 2003 die Forsteinrichtung erneuert wurde. Damit lag aussagekräftiges Datenmaterial aus einer Wiederholungsaufnahme im Zuge einer auf markierten Probeflächen durchgeführten permanenten Stichprobeninventur vor. Der aktuelle Vorrat ist im Universitätswald mit 385 Efm/ha sehr hoch, was einen zusätzlichen Anreiz für Optimierungsüberlegungen darstellte.

## 2 Optimierung des Holzvorrates mit dem „Fischereimodell“

Überträgt man den Grundgedanken des „Fischereimodells“ auf einen Forstbetrieb, so muss man davon ausgehen, dass verschieden hohe Durchschnittsvorräte auch verschieden hohe durchschnittliche Wertzuwächse bedingen. Zunächst musste also ein funktionaler Zusammenhang zwischen der Höhe der durchschnittlichen Wertzuwächse und bestimmten Durchschnittsvorräten gefunden werden.

Für den Universitätswald Landshut lagen entsprechende Informationen aber nur zu einem einzigen Durchschnittsvorrat am Anfang und einem am Ende der Inventurperiode und dementsprechend auch nur über einen einzigen periodisch geleisteten Wertzuwachs vor. Für eine Optimierung nach dem „Fischereimodell“ wurde jedoch ein ganzes Spektrum an Durchschnittsvorräten mit den dazugehörigen durchschnittlichen Wertzuwächsen benötigt. Deshalb wurden basierend auf dem existierenden Datenbestand gezielt neue Stichproben simuliert, die zu ganz verschiedenen Durchschnittsvorräten und durchschnittlichen Wertzuwächsen führten.

Abb. 1 stellt die gefundene Beziehung zwischen den simulierten durchschnittlichen Wertzuwächsen und den entsprechenden simulierten Durchschnittsvorräten dar. Es wurde eine eher vorsichtige, auf dem Wertzuwachsprozent basierende Berechnungsmethode zur Kalkulation der Wertzuwächse verwendet, so dass das Mittel der simulierten Jahreswertzuwächse unter dem periodischen Durchschnitts-Wertzuwachs der abgelaufenen Periode liegt.

Wird nun die erste Ableitung der in Abb. 1 dargestellten Beziehung gebildet, lässt sich die Veränderung des Wertzuwachses bei einer sehr kleinen Veränderung des Holzvorrates analysieren. Mit anderen Worten ausgedrückt bedeutet dies, die Auswirkung einer marginalen Vorraterhöhung (Vorratsminderung) z.B. um 1 Efm auf den Wertzuwachs wird deutlich. Bei einem Ausgangsvorrat in Höhe von 100 Efm/ha würde demnach die Aufstockung des Holzvorrates um 1 Efm zu einer Steigerung des jährlichen Wertzuwachses um ca. 1,9 Euro führen (2,3 Euro bei optimistischen, 1,7 Euro bei pessimistischen Annahmen).

Die Wertzuwachssteigerung ist eine zusätzlich beziehbare, ewige Rente. Diese Rente kann jedoch nur durch Verzicht auf Einnahmen hervorgerufen werden, die für den zur Vorratsanhebung nicht eingeschlagenen Efm hätten erzielt werden können. Die Vorratsaufstockung hat also den Charakter einer Investition, deren Rendite berechnet werden kann. Hierzu muss jedoch bekannt sein, welchen Wert der letzte Efm Holz besitzt, auf dessen Nutzung zur Erzielung eines zukünftig höheren Wertzuwachses verzichtet werden muss. Dieser Wert des letzten Efm an Vorrat ist neben dem entsprechenden Durchschnitts-Vorrat in Abb. 2 auf der waagerechten Achse dargestellt.

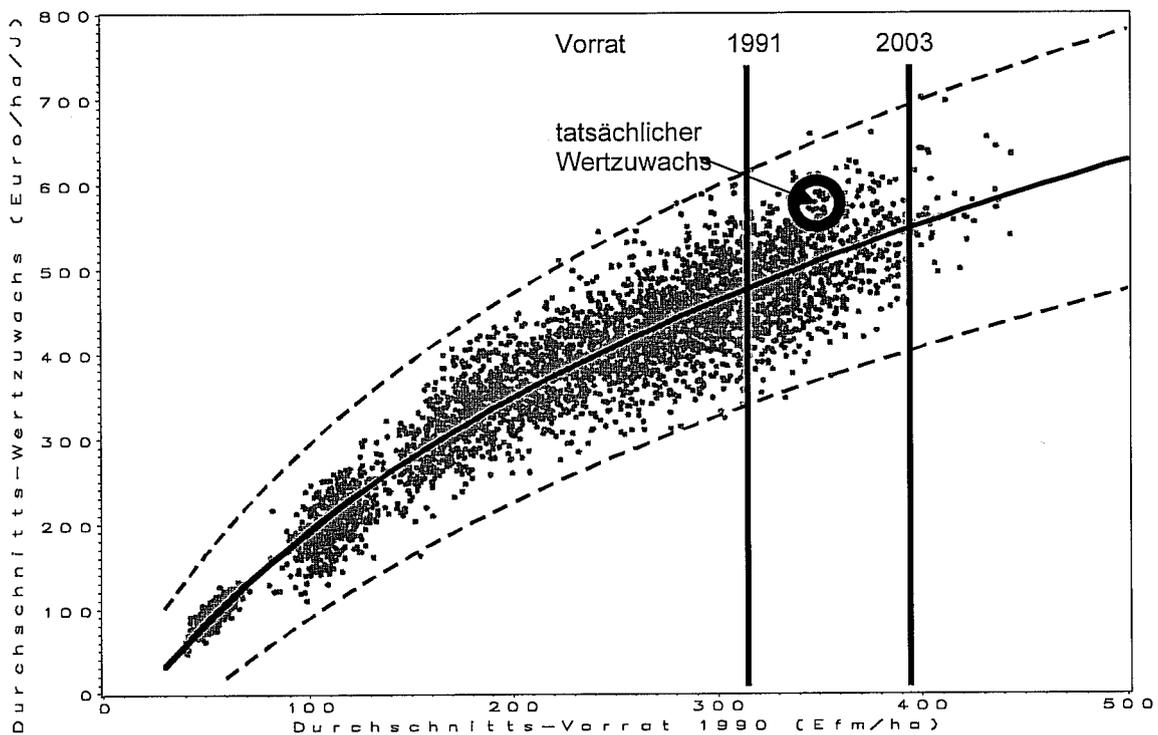


Abb. 1. Anhand zahlreicher Stichprobensimulationen kalkulierte durchschnittliche Wertzuwächse in Abhängig-  
keit von der durchschnittlichen Vorratshöhe (die gestrichelten Linien geben eine optimistische und eine  
pessimistische Entwicklung der Wertzuwächse wieder)

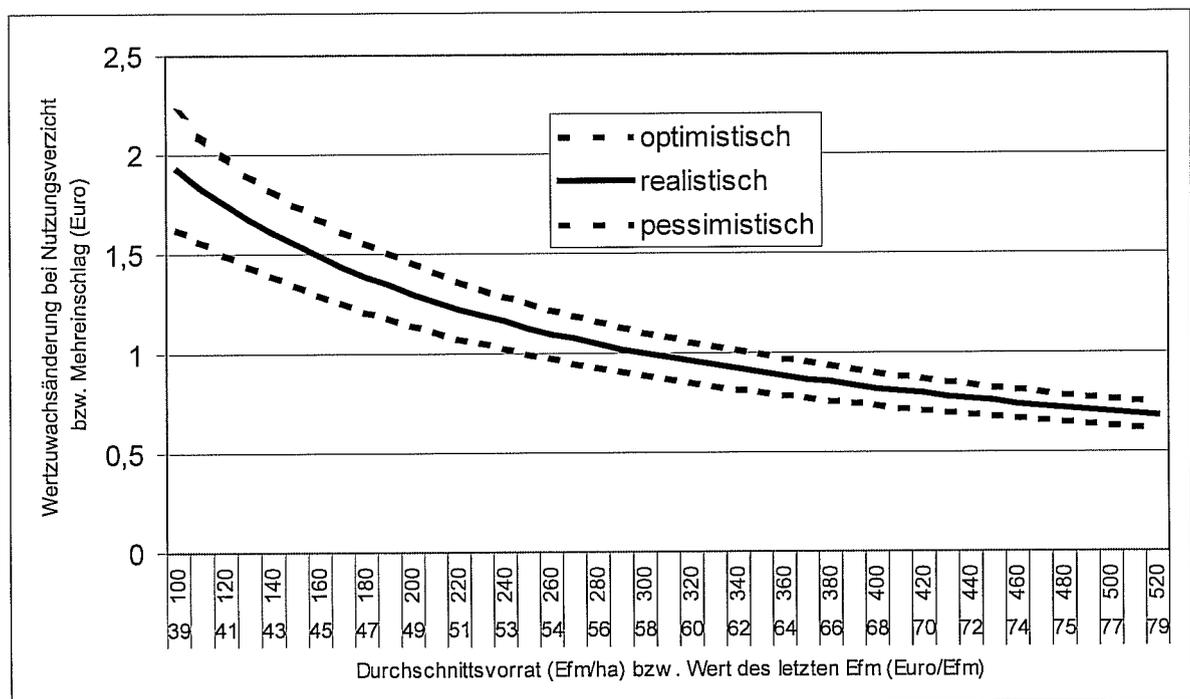


Abb. 2. Veränderung des durchschnittlichen Wertzuwachses bei einer Erhöhung des Durchschnittsvorrates (z.B.  
um 1 Efm) und Wert desjenigen Efm, auf dessen Einschlag zur Vorratsanhebung verzichtet werden muss

So muss beispielsweise auf eine Einnahme in Höhe von 39 Euro verzichtet werden, um den Durchschnittsvorrat von 100 um 1 Efm auf 101 Efm/ha anzuheben, bzw. könnten 39 Euro mehr eingenommen werden, wenn der Durchschnittsvorrat um 1 Efm abgesenkt würde. Der letzte Efm, auf dessen Einschlag bei einer Vorratsanhebung verzichtet werden muss, wird aber immer teurer. So müsste bei einem Vorrat von 380 Efm/ha (das entspricht etwa dem aktuellen Holzvorrat im Universitätswald) auf eine Einnahme von 66 Euro verzichtet werden, um den Vorrat um 1 Efm aufzustocken.

Wird nun die Veränderung des Wertzuwachses bei Anhebung/Senkung des Durchschnittsvorrates als ewige zusätzlich beziehbare Rente (bzw. ewige Mindereinnahme) betrachtet und auf den einmaligen Nutzungsverzicht (Einnahmeausfall) bzw. den einmaligen Mehreinschlag (Zusatz-einnahme) bezogen, lässt sich eine Rentabilitätskennzahl für eine bestimmte Vorratsveränderung ableiten. Diese Rendite, die durch eine Vorratsanhebung um 1 Efm hervorgerufen wird, ist in Abhängigkeit vom Durchschnittsvorrat in Abb. 3 dargestellt.

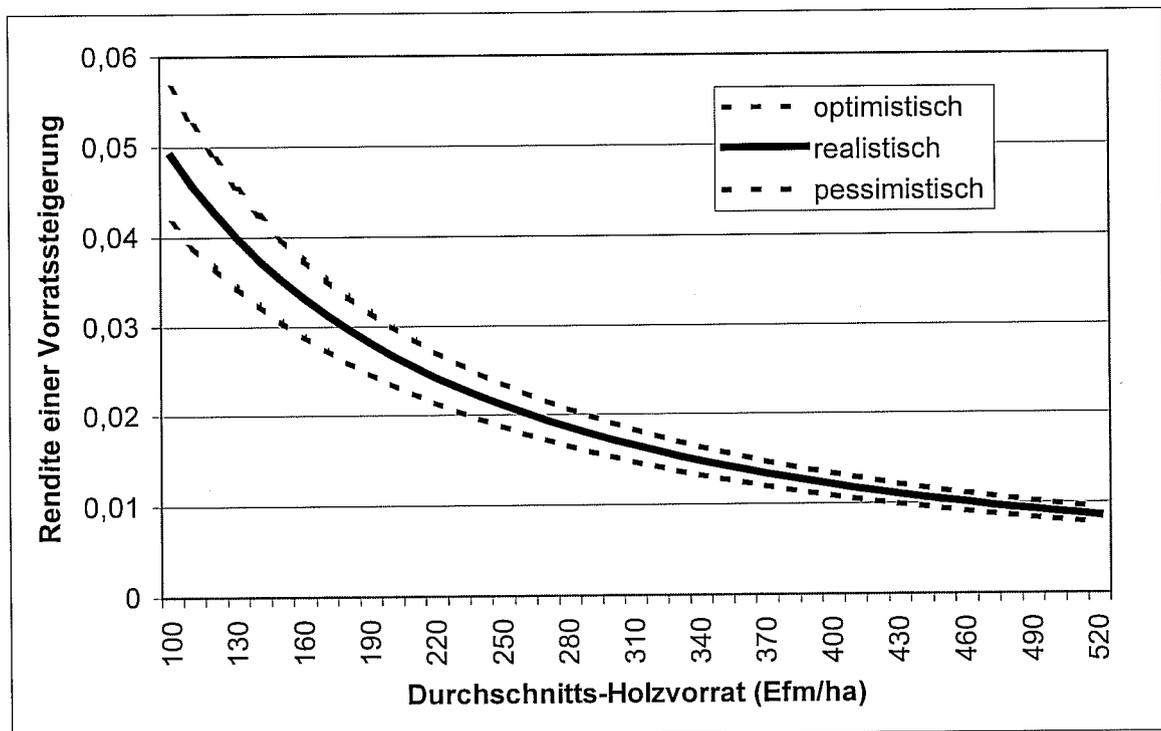


Abb. 3. Rendite einer Vorratsanhebung um 1 Efm in Abhängigkeit von der Höhe des Durchschnittsvorrates

Zudem wird in Abb. 3 eine optimistische und eine pessimistische Einschätzung gegeben, so dass für einen bestimmten Kalkulationszinssatz ein Vorratskorridor abgelesen werden kann.

Bei einer Zinsforderung in Höhe von z.B. 2 % würde sich so ein Vorratsrahmen für einen Zielvorrat ergeben, der von etwa 240 bis rund 300 Efm/ha reicht<sup>1</sup>. Wird ein Kalkulationszins in Höhe von 3 % verwendet, den manche Autoren bei langfristiger Bindung als am Kapitalmarkt erreichbaren, um die Inflationswirkungen bereinigten Realzins ansehen (z.B. Buongiorno et al., 2000), ergibt sich ein „Optimalvorrat“ von im optimistischen Falle rund 200 Efm/ha.

Eine bei Annahme eines Kalkulationszinses in Höhe von 3 % von dem „Fischereimodell“ nahegelegte Rückführung des Holzvorrates auf etwa 200 Efm/ha würde allerdings nahezu eine Halbierung des derzeitigen Holzvorrates bedeuten<sup>2</sup>. Dabei ist zu bedenken, dass die statische Optimierung mit Hilfe des „Fischereimodells“ die Verhältnisse sehr stark vereinfachte, indem der Übergang von derzeit 385 auf dann nur 200 Efm/ha Durchschnittsvorrat vollständig ausgeblendet wurde. Hierdurch könnte es zu einer gewissen Verzerrung des „Optimalvorrates“ gekommen sein (vgl. z.B. Haight und Getz, 1987). Deshalb musste im Folgenden geprüft werden, ob nicht bei einer dynamischen, den Ausgangszustand im Universitätswald und die Übergangsphase berücksichtigenden Optimierung ein anderes Ergebnis resultiert.

### 3 Dynamische Optimierung der Vorratshöhe

Eine dynamische Optimierung setzt die Berücksichtigung des tatsächlichen Ausgangszustandes im Universitätswald voraus. Um das Planungsproblem überschaubar zu halten, wurden die Bestände des Universitätswaldes zu sechs Bestandestypen (dies sind im Folgenden die Planungseinheiten) zusammengefasst. Die Planung bezieht sich auf diese Typen und umfasst einen Zeitraum von 30 Jahren. Als Planungs-Hilfsmittel wurde die lineare Programmierung eingesetzt, welche sich für Optimierungen im Forstbetrieb bereits bewährt (vgl. Kurth, 1994, S. 466; Rose, 1992; Zell, 2001) aber in Deutschland überhaupt noch nicht durchgesetzt hat. Dies ist überraschend, da sich eine solche Vorgehensweise angesichts der Problemstruktur der mittelfristigen Forstbetriebsplanung eigentlich aufdrängt. Zudem hat sich die lineare Programmierung in der englischsprachigen forstwissenschaftlicher Literatur schon lange als Standardverfahren etabliert (z.B. Johnson und Scheurman, 1977). Ein konkretes Anwendungsbeispiel für die lineare Programmierung auf ein mitteleuropäisches Planungsproblem geben z.B. Moog und Knoke (2003), indem sie vor dem Hintergrund von Bewirtschaftungsbeschränkungen Planungsrechnungen für einen Buchen-Modellbetrieb durchführen.

---

<sup>1</sup>Natürlich dürfen die zentralen, stark vereinfachenden Annahmen nicht vergessen werden, die bei dieser Art der Betrachtung implizit gemacht werden. Es wird eine Situation vollkommener Sicherheit hinsichtlich der Informationen über zukünftige Entwicklungen unterstellt. Dies bedeutet z.B., dass die erzielbaren Holzpreise und auch der Volumenzuwächse genau den für die Kalkulationen angenommen Werten entsprechen werden und dass Geldeinnahmen aus dem Universitätswald in unbegrenzter Höhe zu dem entsprechenden inflationsbereinigten Kalkulationszins angelegt bzw. aufgenommen werden können. Zudem geht das „Fischereimodell“ hier stillschweigend davon aus, dass bei einem bestimmten Durchschnittsholzvorrat jährlich genau identische Wertzuwächse geleistet und auch genutzt werden. Sinnvolle Variationen der Holzeinschlagsmengen zur Erzielung von im Zeitverlauf unterschiedlichen Einnahmen, werden nicht betrachtet. All diese Annahmen erscheinen zunächst recht unrealistisch, sind aber bei forstlichen Bewertungsproblemen zum Teil durchaus üblich (z.B. Sagl, 1995). Ihre Unzulänglichkeit muss jedoch unbedingt bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden. Es kommt hier aber v.a. auf die Wertzuwachsunterschiede und die Unterschiede des monetären Durchschnittswertes der Holzvorräte an, die gegenüber Änderungen des Holzpreis- und auch des Zuwachsniveaus weniger empfindlich sind. Die Betrachtungen können deshalb trotz der verhältnismäßig realitätsfernen Annahmen durchgeführt, um Planungen hinsichtlich der Vorratshöhe vornehmen zu können, die auch die kalkulatorischen Kosten einer bestimmten Vorratshöhe angemessen berücksichtigen.

<sup>2</sup>Diese Vorratshöhe ist keineswegs unrealistisch niedrig. So wurde im Jahre 1959 im Universitätswald ein Vorrat von 200 Efm/ha nur knapp erreicht (Köstler, 1959).

### 3.1 Planungseinheiten

Als Planungseinheiten wurden also sechs großflächige Bestandestypen vorgesehen:

- 1) **Pflege Laubholz:** Zu pflegende Laubholz-Bestände in der Etablierungs- und Qualifizierungsphase<sup>3</sup>. Kulturen, Dickungen und Stangenhölzer der I. und II. Altersklasse (bis 39 Jahre) mit über 50 % Flächenanteil an Laubhölzern.
- 2) **Durchforstung Laubholz:** Zu durchforstende Laubholz-Bestände in der Dimensionierungsphase. Baumhölzer der III., IV und V Altersklasse (40-99-jährig) mit über 50 % Flächenanteil an Laubhölzern.
- 3) **Pflege<sup>4</sup> und Durchforstung Nadelholz:** Zu durchforstende Nadelholz-Bestände in der Dimensionierungs- bzw. Kronenpflegephase. Baumhölzer der II., III. und teilweise der IV. Altersklasse (20-69-jährig) mit mindestens 50 % Flächenanteil an Nadelhölzern. Nicht jedoch ab 40-jährige Bestände mit über 80 % Fichtenanteil; diese wurden dem Typ 4 zugeordnet.
- 4) **Langfristige Vorausverjüngung Nadelholz (langfristige Verjüngung):** Langfristig zu verjüngende Nadelholzbestände, in denen die Tanne vorausverjüngt werden kann. Baumhölzer der III. und teilweise der IV. Altersklasse (40-69-jährig) mit über 80 % Flächenanteil an Fichten. Hier soll durch weitgehende Abschöpfung des laufenden Zuwachses eine Akkumulation von Vorrat reduziert bzw. verhindert werden, um stabile, auf Dauer ungleichaltrige Bestände zu erzielen.
- 5) **Reguläre Vorausverjüngung Nadelholz (Verjüngung):** Zu verjüngende Nadelholzbestände, in denen die Buche vorausverjüngt werden soll. Althölzer teilweise der IV. und der V. Altersklasse (70-99-jährig) mit über 50 % Flächenanteil an Nadelholz. Die Verjüngung erfolgt bei ausreichender Stabilität im räumlich geordneten Femelschlag durch Anlage von Gruppenschirmstellungen. Nach 15 Jahren erfolgt die Behandlung dieser Bestände wie unter 6).
- 6) **Vorratsabbau:** Bestände der VI. Altersklasse oder älter (ab 100-jährig) mit ausreichend Vorausverjüngung, in denen bei guten Marktpreisen ein Vorratsabbau erfolgen kann. Stabile Bestandeglieder sollen aber in bringungsgünstiger Lage belassen werden, um jederzeit realisierbare Reserven zu schaffen. Der Anteil des in dieser Art zu belassenden Holzvorrates soll 20 % betragen.

Zur ertragskundlichen Charakterisierung der sechs Bestandestypen wurden jeweils die auf einen bestimmten Typ entfallende Stichprobenflächen genutzt. Anhand dieser Daten wurden typische Modellbestände generiert. Dann erfolgte die Fortschreibung der Modellbestände mit Hilfe des Wachstumsmodells Silva (vgl. Kahn und Pretzsch, 1997) über 30 Jahre (in jeweils 5-jährigen Perioden), aus der sowohl die Entwicklung der Modellbestände als auch die anfallenden Holz mengen hervorgingen. Der verbleibende und der ausscheidende Bestand wurde mit Hilfe aktueller Holzpreise und Ausgaben für die Aufarbeitung und Rückung bewertet (Knoke, 2003).

---

<sup>3</sup> Die Begriffe wurden von Wilhelm, Letter und Eder (1999) eingeführt und eingehend erläutert.

<sup>4</sup> Zu pflegende Nadelholz-Bestände in der Etablierungs- und Qualifizierungsphase mit einem Alter bis zu 19 Jahren hatten nur eine Fläche von etwa 11 ha und wurden nicht als eigener Typ ausgeschieden. Ihre Fläche wurde der Fläche des Bestandestyps „Durchforstung Nadelholz“ zugerechnet.

### 3.2 Beschreibung des verwendeten Datenmaterials

Basierend auf den sechs Bestandestypen sollte nun eine Fortschreibung des ganzen Universitätswaldes über 30 Jahre erfolgen (der Zeitraum wurde analog zu den durchgeführten Simulationsrechnungen in sechs jeweils 5-jährige Perioden untergliedert). Dabei sollte mit Hilfe der linearen Programmierung ein Weg aufgezeigt werden, wie ein bestimmter angestrebter „Ziel-Vorrat“ am besten erreicht und dann gehalten werden kann.

Zunächst wurden hierzu die sechs Bestandestypen und die verwendeten Zuwachsdaten genauer analysiert, um sicherzustellen, dass die Wuchsverhältnisse des Universitätswaldes richtig abgebildet werden. Dann wird auf die Technik der linearen Programmierung und die untersuchten Szenarien eingegangen, mit deren Hilfe langfristige Nutzungsprognosen erstellt werden.

Die Flächen, Alter, Bestockungsgrade und Baumartenanteile der Bestandestypen sind in Tab. 1 angegeben.

Bestandestyp	Fläche (ha)	Alter (J)	B-Grad	Flächenanteile der Baumarten (%)								
				Fi	Ta	Kie	Lä	Dgl	Bu	Ei	Elh	Slh
Pflege Laubholz	66,7	0-39	0,80	4	1	1	3	2	14	24	11	40
Durchforstung Laubholz	54,8	40-99	1,34	14	1	1	4	0	26	28	15	11
Pflege und Durchforstung Nadelholz	74,4	20-69	1,15	41	0	6	19	16	5	4	2	7
Langfristige Verjüngung	49,3	40-69	1,13	95	0	3	1	0	0	0	0	1
Verjüngung	124,7	70-99	1,05	85	3	5	3	2	1	1	0	0
Vorratsabbau	57,6	Ab 100	0,97	69	1	20	6	2	2	0	0	0
Summe:	427,5											

Tab. 1. Kennwerte der sechs Bestandestypen (die Bestockungsgrade und Baumartenanteile wurden mit Hilfe der für die Bundeswaldinventur berechneten Standflächenformeln (vgl. Dahm, 1995) hergeleitet)

Einen sehr großen Teil der Holzbodenflächen nehmen Bestände der Typen „Verjüngung“ und „Vorratsabbau“ ein (insgesamt rund 183 ha). Zusammen mit den etwa 50 ha des Typs „Langfristige Verjüngung“ findet damit auf mehr als der Hälfte der Fläche des Universitätswaldes ein z.T. allerdings sehr langfristig angelegter Generationswechsel statt.

Die anhand der Inventurdaten erstellten Klupplisten der sechs Bestandestypen wurden in das Simulationsmodell Silva eingelesen, um die Fortschreibung durchzuführen. Das Zuwachsniveau der Simulationen lag jedoch wesentlich unter den tatsächlich im Universitätswald gemessenen Zuwächsen<sup>5</sup>. Die simulierten Zuwächse wurden daher i.d.R. um 20 % in manchen Fällen aber auch gutachtlich angepasst. Diese und die tatsächlich verwendeten Zuwachswerte sind in Tab. 2 dargestellt.

<sup>5</sup> Der periodische durchschnittliche Zuwachs lag in der vergangenen Inventurperiode bei rund 12 Efm/ha/J.

Bestandestyp	Vorrat (Efm/ha)	Periode 1		Periode 2		Periode 3		Periode 4		Periode 5		Periode 6	
		2003-2007		2008-2012		2013-2017		2018-2022		2023-2027		2028-2032	
		Z <sub>sim</sub>	Z <sub>adj</sub>										
Pflege Laubholz	69	3	4	6	7	6	7	8	10	8	10	9	10
Durchforstung Laubholz	310	10	12	8	10	9	11	9	11	5	11	7	11
Durchforstung Nadelholz	264	8	10	8	10	9	11	10	12	9	10	11	13
Langfristige Verjüngung	514	14	17	13	16	14	17	11	13	9	12	8	12
Verjüngung	560	11	13	12	14	11	13	10	12	12	14	11	13
Vorratsabbau	504	9	11	10	12	8	11	8	10	5	10	7	10

Tab. 2. Vorräte und laufende jährliche Zuwächse der sechs Bestandestypen (Z<sub>sim</sub>: simulierter Zuwachs, Z<sub>adj</sub>: verwendeter Zuwachs in Efm/ha/J)

Tab. 3 enthält die aus den Simulationen resultierenden Entnahmen.

Bestandestyp	Periode 1	Periode 2	Periode 3	Periode 4	Periode 5	Periode 6
	2003-2007	2008-2012	2013-2017	2018-2022	2023-2027	2028-2032
Pflege Laubholz	0	0	2	4	6	14
Durchforstung Laubholz	36	37	36	36	33	32
Durchforstung Nadelholz	62	16	19	23	28	22
Langfristige Verjüngung	66	67	67	64	64	62
Verjüngung	81	29	35	520	570	627
Vorratsabbau	426	471	521	557	596	622

Tab. 3. Entnahmen innerhalb der Perioden in Efm/ha (*fett und kursiv*: für den Typ „Vorratsabbau“ ist die Vorratsentwicklung angegeben, auch für den Typ „Verjüngung“ ist ab der 4. Periode ein Vorratsabbau möglich, der Vorratsabbau findet aber nie in einer Periode auf der vollen Typenfläche statt, sondern nur auf Teilflächen)

Die Entnahmesätze für den Typ „Durchforstung Nadelholz“ erscheinen niedrig. Dieser Bestandestyp enthält aber nur zu 41 % Fichten. Im Übrigen handelt es sich v.a. um Kiefern, Lärchen und Laubholz so dass ein etwas geringerer Entnahmesatz realistisch erscheint. Für den Bestandestyp „Langfristige Verjüngung“ wurde mit sehr hohen Entnahmen von rund 130 Efm/Jahrzehnt versucht, einen Vorratsaufbau zu verhindern.

Tab. 4 gibt Aufschluss über die mit den Holzentnahmen korrespondierenden Deckungsbeiträge.

Bestandestyp	Periode 1	Periode 2	Periode 3	Periode 4	Periode 5	Periode 6
	2003-2007	2008-2012	2013-2017	2018-2022	2023-2027	2028-2032
Pflege Laubholz	-500	-500	-300	-300	-200	-200
Durchforstung Laubholz	906	786	649	1009	611	657
Durchforstung Nadelholz	1480	200	370	250	843	294
Langfristige Verjüngung	2896 (750)	2859	2855 (750)	2872	2812 (750)	2752
Verjüngung	3374 (1000)	1586	1392 (500)	25744	28398	31436
Vorratsabbau	16211 (2000)	19231 (1500)	22523 (1000)	24848 (500)	27383	28550

Tab. 4. Kalkulatorische Deckungsbeiträge innerhalb der Perioden in Euro/ha (in Klammern: bereits vom Nettoholzerlös abgesetzte Kulturausgaben)

### 3.3 Methodische Umsetzung der Linearen Programmierung für den Universitätswald

Waldbauliche Aktivitäten können als flächenbezogene Maßnahmen aufgefasst werden, die mit bestimmten Deckungsbeiträgen (vgl. Tab. 4) verbunden sind. Die Flächen für solche Maßnahmen sollen nun im Sinne eines optimalen Produktionsprogramms bestimmten Bestandestypen und zugleich Zeitpunkten (Perioden) zugeordnet werden. Die Optimierungsaufgabe entspricht damit genau dem Grundproblem der Forstbetriebsplanung, welches seit jeher in der Herstellung einer Raum-Zeitordnung für einen Forstbetrieb besteht (z.B. Judeich, 1871).

Der Grundgedanke des verwendeten Planungsmodells besteht darin, durch eine entsprechende Zuordnung von Flächen zu Bestandestypen und Zeitpunkten eine Zielfunktion zu maximieren. Gleichzeitig sollen aber bestimmte lineare und auch nicht lineare Restriktionen (betriebliche Anforderungen) beachtet werden. Die waldbaulichen Aktivitäten leisten über ihren Deckungsbeitrag und die für sie vorgesehenen Flächen einen positiven bzw. negativen Beitrag zur Zielfunktion. Konkret müssen also die innerhalb der sechs definierten Bestandestypen zu pflegenden, zu nutzenden oder in Bestockung zu bringenden Flächen den betrachteten sechs Perioden (die jeweils fünf Jahre umfassen) so zugeordnet werden, dass die Zielfunktion unter Einhaltung der noch aufzuzeigenden Restriktionen maximiert wird. Als Zielfunktion soll die Summe der prolongierten Deckungsbeiträge der einzelnen Kultur-, Hiebs- oder Pflegemaßnahmen gewählt werden. Restriktionen bestehen in Form von Forderungen hinsichtlich der zur Deckung der Verwaltungsausgaben notwendiger jährlicher Mindest-Einnahmen, durch maximale bzw. minimale Einschlagsmengen (Nachhaltigkeitskriterien) sowie durch vorgegebene Mindest-Pflegeflächen. Auch ein nicht zu unterschreitender Mindestvorrat („Zielvorrat“) soll als betriebliche Restriktion in die Planungsrechnung eingeführt werden, um die Auswirkung eines bestimmten Vorrates auf die Zielfunktion aufdecken zu können.

Das beschriebene Problem enthält insgesamt 36 Entscheidungsvariablen, weil die Flächen, auf denen waldbauliche Aktivitäten stattfinden sollen, sechs Bestandestypen und sechs Perioden zugeordnet werden sollen. Es handelt sich damit um ein noch nicht sehr komplexes Problem, welches ohne weiteres mit dem Excel-Solver (Fylstra et al., 1998) gelöst werden kann, der auch für die im Folgenden vorgestellten Berechnungen zum Einsatz kam.

Zur Optimierung wurde also ein Zeitraum von 30 Jahren betrachtet, der sich aus sechs jeweils 5-jährigen Perioden zusammensetzte. Eine noch feinere Auflösung z.B. in 1-jährige Perioden würde die Kapazität des Excel-Solvers übersteigen. Eine solch hohe Auflösung ist auch aufgrund der Tatsache, dass die ertragskundlichen Daten nur für 5-jährige Zeitabschnitte verfügbar sind, nicht sinnvoll. Zudem wäre eine jährliche Planung über 30 Jahre schon wegen der Unsicherheit der Holzmarktentwicklung unangemessen.

Die konkret verwendete Zielfunktion lautete:

$$\sum_{n=1}^6 \sum_{t=2,5,7,5,12,5,17,5,22,5,27,5} Db_{nt} \cdot Fläche_{nt} \cdot (1+i)^{30-t} + \frac{WZW(V)}{i} = \max$$

$n$	Bestandestyp 1 bis 6
$t$	Eingriffszeitpunkt
$Db_{nt}$	Deckungsbeitrag eines Hiebes (einer Pflege) in Bestandestyp $n$ zum Zeitpunkt $t$ , entstehende Kulturkosten wurden vor der Optimierung direkt vom Nettoholzerlös der Endnutzungen abgesetzt
$Fläche_{nt}$	Fläche einer Maßnahme in Bestandestyp $n$ zum Zeitpunkt $t$ (Entscheidungsvariable)
$WZW(V)$	Vom durchschnittlichen Holzvorrat abhängender, nachhaltiger Wertzuwachs in Euro/ha/J nach Ablauf der 30 Jahre
$i$	Zinssatz als Dezimalzahl

Folgende Restriktionen wurden verwendet:

- Die Flächenausstattung der Bestandestypen bildet das Maximum der innerhalb der Perioden zu pflegenden, zu durchforstenden, zu verjüngenden oder abzunutzenden Flächen.
- Mindestens 80 % der Fläche der Vornutzungsbestände muss in jeder Periode gepflegt oder durchforstet werden.
- In jeder Periode müssen mindestens 3.000 Efm/J eingeschlagen werden, maximal darf der Einschlag auf 7.000 Efm/J angehoben werden.
- Es sollen mindestens 60.000 Euro/J in jeder Periode eingenommen werden (ernte- und kulturausgabenfrei), um die Ausgaben für den Revierförster und die Sekretärin zu decken.
- Der Mindestvorrat soll in den Periode 3, 5 und am Ende der Planungsrechnung dem vorgegebenen Mindestvorrat entsprechen.
- Die geplanten Flächengrößen müssen positiv sein (Nichtnegativität).

### 3.4 Ergebnisse der linearen Programmierung

#### 3.4.1 Optimierung unter Beibehaltung der aktuellen Vorratshöhe

Zunächst wurde eine Optimierung durchgeführt, die in den Perioden 3, 5 und am Ende der 30 Jahre mindestens zu einem Vorrat in Höhe von 385 Efm/ha (aktueller Vorrat) führte, und die einen Vorratsabbau nur in den ältesten Beständen (Typ „Vorratsabbau“) sowie ab der 4. Periode im Bestandestyp „Verjüngung“ zuließ. Die Integration eines Vorratsabbaus war notwen-

dig, denn ohne diese Maßnahme war es nicht möglich, eine weitere Vorratsanreicherung zu verhindern. Eine Alternative wäre nur die komplette Räumung gewesen, die mit den Grundsätzen eines ökologischen Waldbaus aber nicht vereinbar gewesen wäre. In einer Periode mit dem Ziel des Vorratsabbaus behandelte Flächen wurden in der nächsten Periode dem Typ „Pflege Laubholz“ zugerechnet. Die auf diesen Flächen stattfindende Vorratsentwicklung wurde jedoch aus der Fichtenertragstafel von Assmann und Franz (1972, Oberhöhenbonität 40) entnommen, da die Fichte in der Vorausverjüngung mit Abstand die größte Fläche einnimmt (Knoke, 2003).

Tab. 5 enthält den aus der Optimierung hervorgehenden Flächenplan dieser Lösung, der im folgenden als Referenzlösung dienen soll. Die Flächenkapazitäten müssen in der Vornutzung weitgehend (bis auf 80 %) ausgeschöpft werden, damit besteht hier kein Spielraum für eine Optimierung. Vielmehr ist interessant, wie die zur Verjüngung und zum Vorratsabbau vorgesehenen Flächen den entsprechenden Perioden zugeordnet werden. Einen zeitlichen Schwerpunkt der Nutzungen zum Vorratsabbau bildet die Periode 1 mit 24 ha. Bis zum Ende der Betrachtung findet aber innerhalb dieses Typs nur auf 41 ha ein Vorratsabbau statt (rund 58 ha hätten aber genutzt werden können). In den Perioden 4, 5 und 6 werden verstärkt Bestände des Typs „Verjüngung“ für einen Vorratsabbau vorgesehen. Hier werden über die letzten 15 Jahre des Planungshorizontes verteilt auf einer Fläche von insgesamt 101 ha Eingriffe zum Vorratsabbau durchgeführt (hier hätten insgesamt 125 ha eingeschlagen werden können).

Im Durchschnitt mündet das beschriebene Vorgehen in einem Holzanfall von 4.707 Efm/J (11,0 Efm/ha/J) und in durchschnittliche ernte- und kulturausgabenfreien Einnahmen in Höhe von 182.360 Euro/J (427 Euro/ha/J). Die Ausgaben für die Pflege und die Kulturen belaufen sich auf 59 Euro/ha/J, so dass ein kalkulierter Wertzuwachs in Höhe von fast 490 Euro/ha/J resultiert.

Gepflegte, durchforstete und verjüngte Flächen (in ha)						
	Periode 1	Periode 2	Periode 3	Periode 4	Periode 5	Periode 6
Bestandestypen	2003-2007	2008-2012	2013-2017	2018-2022	2023-2027	2028-2032
Pflege Laubholz	53	72	81	86	125	135
Durchforstung Laubholz	55	55	55	55	55	55
Durchforstung Nadelholz	74	74	74	74	74	74
Langfristige Verjüngung	49	49	49	49	49	49
Verjüngung	125	125	125	<i>49</i>	<i>13</i>	<i>40</i>
Vorratsabbau	<i>24</i>	<i>10</i>	<i>7</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
Holzeinschlag (Efm/J)	6.001	3.000	3.000	6.510	3.000	6.636
Netto-Einnahmen (Euro/J)	208.551	111.826	95.996	289.023	106.300	282.468
<b>Mittl. Holzeinschlag in der Dekade (Efm/J)</b>		<b>4.500</b>		<b>4.755</b>		<b>4.818</b>

Tab. 5. Gepflegte, durchforstete bzw. verjüngte Flächen innerhalb der Perioden in ha sowie die dabei eingeschlagenen jährlichen Holzmengen und die anfallenden Einnahmen für eine Einschlagsstrategie, die langfristig zur Konstanz des Holzvorrates führt (*fett und kursiv*: Flächen, die zum Vorratsabbau vorgesehen werden)

Wird berücksichtigt, dass der für die Fortschreibung verwendete Volumenzuwachs etwa 1 Efm unter dem tatsächlich gemessenen Zuwachs lag und dass zunächst eine Wertzuwachs-mindernde Vorratsabsenkung stattfindet, erscheint dieser Wertzuwachs zwar etwas niedrig, aber dennoch plausibel.

Zur Maximierung der Zielfunktion wird im Zuge dieses Vorgehens innerhalb der ersten 5 Jahre ein hoher Holzeinschlag vorgesehen, indem die Holzernte bis auf rund 6.000 Efm/J ausgedehnt wird. Hierdurch wird der Spielraum (7.000 Efm/J wären möglich) allerdings noch nicht voll ausgeschöpft. Für die ersten 10 Jahre ergibt sich aufgrund der in der 2. Periode nur geringen Holzeinschläge aber ein durchschnittlicher Holzeinschlag in Höhe von nur 4.500 Efm/J. Aufgrund dieses zurückhaltenden Einschlags wird in der 3. Periode bereits wieder ein Vorrat von 385 Efm/ha erreicht (dies wurde als Restriktion vorgegeben), obwohl der Holzvorrat in der 1. Periode auf 345 Efm/ha abgesenkt wurde (vgl. Abb. 4).

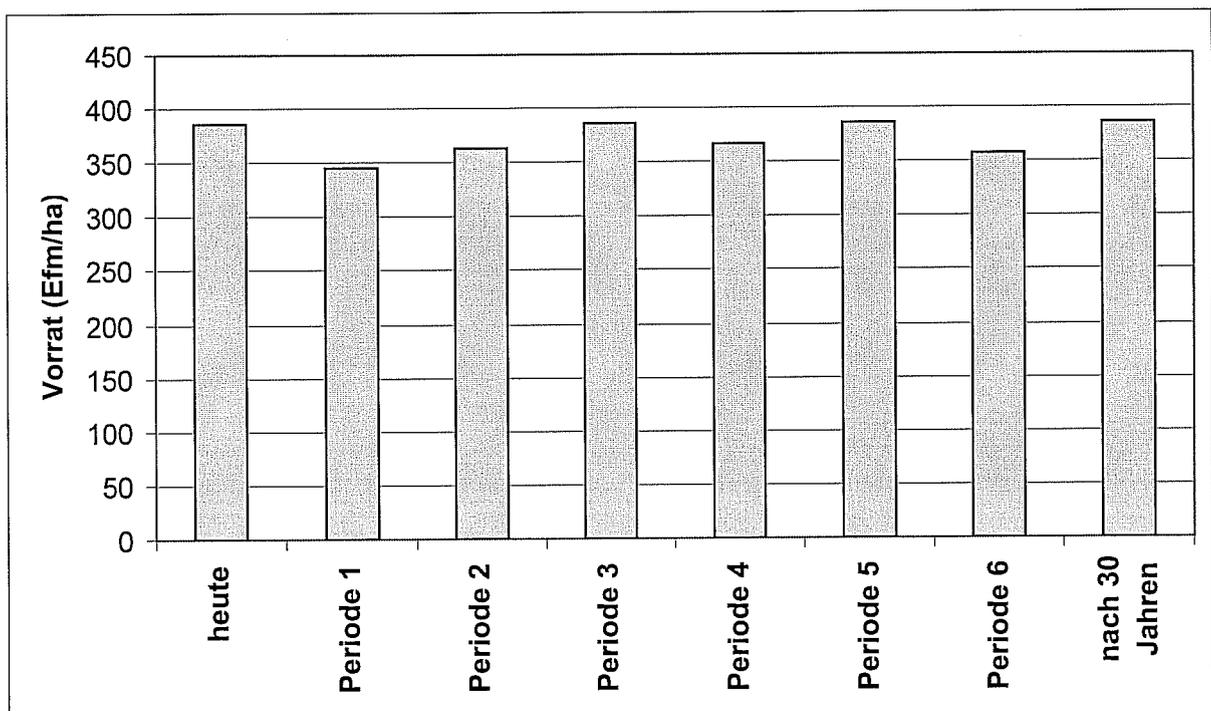


Abb. 4. Entwicklung des Durchschnittsvorrates, wenn der Vorrat in etwa konstant gehalten werden soll (Vorräte in den Perioden 1 bis 6 immer nach dem Einschlag)

### 3.4.2 Optimierung bei langfristiger Absenkung des Holzvorrates

In diesem Abschnitt soll untersucht werden, welche finanziellen Konsequenzen mit einer Vorratsenkung verbunden sind. Zu diesem Zweck wurden weitere Optimierungsrechnungen durchgeführt, bei denen der „Zielvorrat“ schrittweise von 385 auf 295 Efm/ha gesenkt wurde, wobei die Absenkung in 30 Efm-Schritten erfolgte. Die durchschnittlichen Hiebssätze stiegen hierdurch von 4.707 („Zielvorrat“ 385 Efm/ha) über 5.133 („Zielvorrat“ 355 Efm/ha), 5.380 („Zielvorrat“ 325 Efm/ha) auf 5.526 Efm/J an („Zielvorrat“ 295 Efm/ha).

Nun sollte die Wirtschaftlichkeit der in Form von Restriktionen eingeführten „Zielvorräte“ geprüft werden, um Erkenntnisse zur „optimalen“ Vorratshöhe ableiten zu können. Hierzu wurden die Opportunitätskosten herangezogen, die mit der Forderung eines bestimmten Mindestvorrates verbunden waren. Die lineare Programmierung gibt diese Kosten im Form der

sogenannten Schattenpreise der Vorratsrestriktion an. Die Schattenpreise der jeweiligen „Zielvorräte“ geben an, um wie viel Euro die Zielfunktion zunehmen würde, wenn der geforderte Mindestvorrat um einen Efm unterschritten werden dürfte.

In Abb. 5 sind diese Opportunitätskosten für verschiedene Vorratshaltungen und bestimmte Zeitpunkte (zu denen der gewünschte Vorrat gerade eingestellt werden sollte) angegeben. Die höchsten Kosten werden durch ein Halten des derzeitigen Vorrats von 385 Efm/ha verursacht. Eine Senkung des Zielvorrates um nur einen Efm/ha (also auf 384 Efm/ha), was für den ganzen Forstbetrieb eine um rund 428 Efm höhere Einschlagsmöglichkeit bedeutet, würde die Zielfunktion um rund 23.000 Euro anheben. Während eine Absenkung des Vorrates in Periode 3 etwa 8.000 und ein 1 Efm niedrigerer Vorrat in Periode 5 knapp 5.000 Euro zu diesem Betrag beisteuern, kann mit über 10.000 Euro die größte Steigerung der Zielfunktion durch eine marginale Vorratsabsenkung ganz am Ende der Betrachtung erreicht werden.

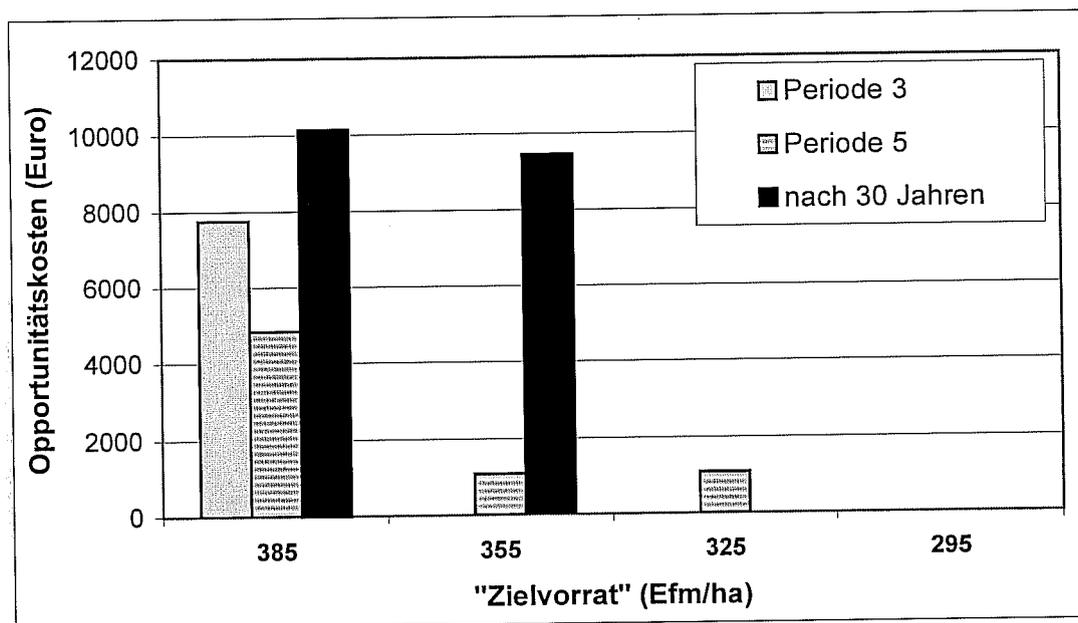


Abb. 5. Schattenpreise (Opportunitätskosten) verschiedener Vorratshaltungen

Der wirtschaftlich optimale Holzvorrat ist aber offensichtlich erst dann erreicht, wenn durch eine weitere Vorratsabsenkung keine Steigerung der Zielfunktion mehr möglich ist. Dies ist bereits bei einer Vorrathaltung zwischen 295 und 325 Efm/ha der Fall. Dieser Holzvorrat liegt um rund 100 Efm/ha über dem Vorrat, der nach der statischen Optimierung mit Hilfe des „Fischereimodells“ als „optimal“ erschien.

Beispielhaft sollen im Folgenden kurz die Konsequenzen einer Absenkung des Holzvorrates auf 320 Efm/ha genauer untersucht werden, da dies der Holzvorrat ist, der langfristig im Universitätswald angestrebt werden soll (Knoke, 2003).

Die Ausgaben für die Kulturen und die Pflege in den Jungbeständen steigen bei diesem „Zielvorrat“ im Vergleich zu einem Halten des aktuellen Vorrates durch die größeren Vorratsabbauf lächen nur wenig von durchschnittlich 59 auf im Mittel 61 Euro/ha/J an. Die Zielfunktion nimmt aber durch den Vorratsabbau insgesamt um 784.514 Euro zu. Werden die ungleichmäßig über den Betrachtungszeitraum verteilten Mehreinnahmen gleichmäßig und zinsfrei auf die Dauer von 30 Jahren umgelegt, ergeben sich durchschnittliche Mehreinnahmen in Höhe von 29.240 Euro/J. Unter Beachtung der Zinswirkung resultiert ein der Zunahme

der Zielfunktion äquivalenter Jahresbetrag in Höhe von rund 16.490 Euro, also etwa 39 Euro/ha/J. Dieser Betrag kann als aufgrund der Vorratsminderung resultierender finanzieller Vorteil interpretiert werden.

## 4 Diskussion und Zusammenfassung

Der Beitrag hatte zum Ziel, die folgenden Fragen zu klären:

- 1) Existiert im Universitätswald eine Beziehung zwischen der durchschnittlichen Höhe des Holzvorrates und dem durchschnittlichen Wertzuwachs?
- 2) Lässt sich eine solche Beziehung zur Ableitung einer „optimalen“ Vorratshöhe nutzen?
- 3) Wird die statisch abgeleitete Vorratshöhe bei Berücksichtigung der Übergangsphase (von aktuellem zu angestrebtem Holzvorrat) bestätigt?

In Bezug auf die Frage 1 konnte mit Hilfe von simulierten Stichproben eine Beziehung zwischen dem durchschnittlichen Wertzuwachs und dem durchschnittlichen Holzvorrat konstruiert werden. Innerhalb eines Vorratsrahmens von rund 50 bis 450 Efm/ha ergab sich ein stetiger Anstieg des Wertzuwachses, wobei die Steigerungsraten mit zunehmender Vorratshöhe deutlich abnahmen.

Frage 2 kann zwar grundsätzlich mit „Ja“ beantwortet werden, denn es konnte tatsächlich eine Rentabilitätskennzahl aus der Beziehung zwischen dem durchschnittlichen Wertzuwachs und der durchschnittlichen Vorratshöhe abgeleitet werden. Diese Kennzahl gibt die interne Verzinsung einer marginalen Vorratserhöhung, z.B. um 1 Efm an. Die Annahmen des „Fischereimodells“ sind aber insbesondere hinsichtlich der Forderung nach der kompletten Nutzung des jährlich exakt gleich hohen Wertzuwachses sehr restriktiv und unrealistisch, so dass die Ergebnisse der statischen Optimierung mit Hilfe des Fischereimodells vorsichtig interpretiert werden müssen.

So konnte vor dem Hintergrund der Frage 3 und basierend auf einer dynamischen, deutlich weniger restriktiven Optimierung (mit Hilfe der linearen Programmierung) ein erheblich höherer Optimalvorrat abgeleitet werden, als es nach den auf dem „Fischereimodell“ fußenden Befunden zu erwarten war. Während das „Fischereimodell“ bei einem Kalkulationszins von 3 % eine Vorratssenkung auf maximal 200 Efm/ha nahe legte, können basierend auf der linearen Programmierung Vorräte in einem Rahmen von 295 bis 325 Efm/ha als Orientierungshilfen für die Forstbetriebplanung und die Wirtschaftsführung im Universitätswald empfohlen werden.

## 5 Literatur

Bay. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (1990 [a]): *Hilfstafeln für die Forsteinrichtung: Zusammengestellt für den Gebrauch im Bayerischen Staatswald.*

Borchert, H. (2001): *Die Bestimmung der für Forstbetriebe ökonomisch optimalen Holznutzungsmengen - Ein kontrolltheoretischer Ansatz -*. Dissertation an der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement, TU München.

Buongiorno, J.; Kolbe, A. und Vasievich, M. (2000): *Economic and ecological effects of diameter-limit and BDq management: simulation results for northern hardwoods.* *Silva Fennica* 34: 223-235.

- Dahm, S. (1995): Bundeswaldinventur - Auswertungsmodelle und Vorschläge zur Effektivitätssteigerung. Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Nr. 180. Hamburg: Max Wiedebusch.
- Deegen, P. (2002): Zur Relevanz von Modellen der intertemporalen Ressourcenökonomie für die finanzielle Analyse naturnaher Waldformen. *Forst und Holz* 57: 654-659.
- Fylstra, D., Lasdon, L., Watson, J. und Waren, A. (1998). Design and Use of the Microsoft Excel Solver. *Institute for Operations Research and the Management Science. Interfaces* 28: 29-55.
- Haight, R.G. und Getz, W.M. (1987): Fixed and Equilibrium Endpoint Problems in Uneven-Aged Stand Management. *Forest Science* 33: 908-931.
- Johnson, K. N. und Scheurman, H. L. (1977): Techniques for Prescribing Optimal Timber Harvest and Investment Under Different Objectives - Discussion and Synthesis. *Forest Science Monograph* 18.
- Judeich, F. (1871): *Die Forsteinrichtung*. Dresden: Schönfeld's Verlagsbuchhandlung.
- Kahn, M. und Pretzsch, H. (1997): Das Wachstumsmodell SILVA - Parametrisierung der Version 2.1 für Rein- und Mischbestände aus Fichte und Buche. *Allg. Forst- u. J. Ztg.* 168: 115-123.
- Knoke, T. (2003): *Forstwirtschaftsplan für den Stiftungswald der Ludwig-Maximilians-Universität München 2003-2022*. Lehrstuhl für Waldbau und Forsteinrichtung der TU München.
- Köstler, J.N. (1960): *Wirtschaftsplan 1959 für den Stiftungswald der Ludwig-Maximilians-Universität München*.
- Kurth, H. (1994): *Forsteinrichtung: Nachhaltige Regelung des Waldes*. Berlin: Deutscher Landwirtschaftsverlag.
- Möhring, B. (1997): Betriebswirtschaftliche Probleme und Chancen. *Allgem. Forstz./Der Wald* 52: 67-71.
- Moog, M. und Knoke, T. (2003): Zur betriebswirtschaftlichen Bewertung von Einschränkungen der Waldbewirtschaftung. *Forstw. Cbl.* 122: 59-76.
- Mosandl, R. (1993): Der ökologische Waldbau. *Der Wald* 43: 400-405.
- Oderwald, R.G. und Duerr, W.A. (1990): König-Faustmannism: A Critique. *Forest Science* 36: 169-174.
- Rose, D. (1992): *Quantitative Modelle in der strategischen Planung am Beispiel der Forstwirtschaft*. Dissertation an der Universität Freiburg, Hochschul Verlag.
- Sagl, W. (1995): *Bewertung in Forstbetrieben*. Pareys Studentexte 80. Berlin, Oxford [u.a.]: Blackwell Verlag.
- Wilhelm, G.J.; Letter, H.-A. und Eder, W. (1999): Konzeption einer naturnahen Erzeugung von starkem Wertholz. *Allgem. Forstz./Der Wald* 54: 232-240.
- Zell, J. (2002): *Ökonomische Optimierung der Zieldurchmesserernte bei der Buche unter Berücksichtigung des Risikos rotkernbedingter Entwertung – ein Anwendungsbeispiel der Linearen Programmierung*. Institut für Forstökonomie der Universität Freiburg, Arbeitsbericht 32-2002.