

Behandlungsoptionen zur Wertholzerzeugung bei der Baumart Buche

Joachim Langshausen & Heinrich Spiecker

Institut für Waldwachstum der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Tennenbacherstraße 4, 79085 Freiburg

1 Einleitung

Die Untersuchung der Auswirkung unterschiedlicher Behandlung auf Ertrags- und Dimensionsgrößen von Bäumen gehört seit der Etablierung der Forstwissenschaft, insbesondere aber mit dem Entstehen des planmäßigen Forstlichen Versuchswesens vor rd. eineinhalb Jahrhunderten zum Arbeitsprogramm der Waldwachstumsforschung (NOBBE 1877, SCHWAPPACH 1904). Es erscheint daher zunächst erstaunlich, dass bei der am weitesten verbreiteten Laubbaumart Deutschlands, der Buche (*Fagus sylvatica* L.), bis in jüngste Zeit hinein die Frage der Behandlungskonzepte in Wissenschaft und Praxis kontrovers diskutiert wird. Ansatzpunkt der jüngsten Diskurswelle waren Behandlungsvorschläge von WILHELM, LETTER & EDER (1999), die sich als besondere Form eines zweiphasigen Pflegekonzeptes durch das abrupte und definitive Beenden des Astreinigungsprozesses bzw. eine starke Anregung des Kronenausbaus und Durchmesserwachstums auszeichnen. Die dieser Konzeption zu Grunde liegenden waldwachstumkundlichen Wirkungszusammenhänge, die starke Durchmesserzuwachsreaktion der Buche auf Standraumerweiterungen, waren zwar bereits seit langer Zeit bekannt (z.B.: HECK 1931, MICHAELIS 1935, ALTHERR 1971), dem vorgenannten Beitrag ist es jedoch zu verdanken, die Diskussion um die Frage der Beiträge qualitativer Merkmale wie Dimension und Qualität einerseits und Volumenwachstumsleistung andererseits zur Wertproduktion neuerlich angeregt zu haben. Während WILHELM, LETTER & EDER (1999) vermuten, mit vergleichsweise geringen Anzahlen großkroniger Wertbäume mit hohen Durchmessern und breiten astfreien Mänteln ein Maximum an Wertleistung zu erzielen, führen Kritiker dieser Vorgehensweise als Gegenargumente die geringere Produktivität großkroniger Bäume (UTSCHIG 2002), die Erfolgsabhängigkeit von hohen Holzpreisen deren Fortbestand als zweifelhaft angesehen wird (UTSCHIG 2000, SPELLMANN 2005) sowie ein höheres Risiko durch größere relative Verluste beim vorzeitigen Ausfall von Auslesebäumen ins Feld. Da neben weiteren, unbestreitbar alle der genannten Faktoren einen wichtigen Einfluss auf die Wertleistung von Behandlungskonzepten bei der Buche ausüben, liegt es auf der Hand, dass ein theoretischer Optimierungsansatz alle genannten Aspekte auf der Basis geeigneter waldwachstumkundlicher Zusammenhänge und Modelle berücksichtigen muss ZEIDE (2001). Ziel des nachfolgend vorgestellten Forschungsvorhabens ist es daher,

- a) Einfache waldwachstumkundliche Modelle zur Prognose der Dimensions- und Qualitätsentwicklung für Auslesebäume der Baumart Buche zu entwickeln, mit deren Hilfe
- b) die Auswirkung von Wertholz-orientierten Behandlungsoptionen unterschiedlicher Standraumentwicklung auf naturale und monetäre Wertleistungskomponenten untersucht werden können.

Im Unterschied zu früheren Versuchsanstellungen wird hier die **astfreie Schaftlänge im Verhältnis zur Höhe der Auslesebäume zum Erntezeitpunkt** als Variable zur Bezeichnung der Behandlungsoptionen eingesetzt. Diese Charakterisierungsvariable bietet eine Reihe von Vorteilen, so insbesondere ihre gleichzeitige Eignung als Steuerungsgröße (vgl. Kap. 2), die zentrale Position der Höhe des Kronenansatzes im System der waldwachstumkundlichen Modelle (Kap. 3 & 4) sowie nicht zuletzt die metrische Skalierung der Größe, die die Untersuchung eines Kontinuums zusammenhängender Behandlungsoptionen erlaubt bzw. vereinfacht.

2 Untersuchungsansatz

Um dieses Ziel zu erreichen wird in einem ersten Schritt die Entwicklung empirisch basierter Wachstumsmodelle für die Buche angestrebt. Ein grundsätzlich zu bevorzugender Ansatz zur Gewinnung der Grundlagendaten ist die Nutzung bereits über lange Zeiträume hinweg verfolgter, wissenschaftlicher Versuchsanstellungen, im gegebenen Fall also langfristig beobachteter Versuchsflächen. Da entweder im Hinblick auf die Versuchssteuerung (d.h. insbesondere die definitive Beendigung des Astreinigungsprozesses), die Erfassung der interessierenden Variablen (hier insbesondere der Kronenbreiten- und Kronenansatzhöhen) oder schließlich der Versuchslaufzeit (die heute vorhandenen Buchen-Versuchsflächen deren Versuchskonzept dem hier zu untersuchenden Ansatz entspricht sind innerhalb der letzten Dekade angelegt worden), kein den Idealvorstellungen entsprechendes Material gefunden werden konnte, musste zwangsläufig ein retrospektiver Ansatz gewählt werden, bei dem die Entwicklung im Nachhinein rekonstruiert werden musste. Da sich auf der Basis eigener Auswertungen bereits in der frühen Phase der Projektkonzeption herauskristallisierte, dass die Identifikation, Lokalisierung und Aufnahme von Einzelbäumen mit definitivem Abschluss der natürlichen Astreinigung nicht realisierbar sein würde, wurde in Anlehnung an die Methodik früherer Untersuchungen zu Eichenarten (*Quercus petraea* (Matt.) Liebl. & *Q. robur* L.) (SPIECKER 1991; NUTTO 1999) bzw. Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und Bergahorn (*Acer pseudoplatanus* L.) (HEIN 2004) das Wuchsreihenprinzip, d.h. des Ersatzes des zeitlichen Nacheinander durch das räumliche Nebeneinander, verfolgt. Ausgerichtet an den angestrebten Gültigkeitsgrenzen der zu entwickelnden Modelle wurden Untersuchungseinheiten von mindestens 30 räumlich zusammenhängenden Einzelbäumen ausgewählt, die das Alters-, Bonitäts- und Standraumspektrum abdecken, in denen die Gesetzmäßigkeiten untersucht werden sollten.

Diese Einzelbaum-Wachstumsmodelle sollen in Verbindungen mit Informationen über die Überschirmungsverhältnisse den Übergang vom Einzelbaumwachstum hin zu Bestandesentwicklungsmodellen erlauben. Zur Informationsbeschaffung über die Form des Schaftes und die Volumina von Einzelbäumen und Baum-Biomasse-Kompartimente werden publizierte Modelle herangezogen.

3 Material und Methoden

3.1 Material

Eine Übersicht über die geografische Herkunft des verwendeten Materials gibt die nachfolgende Abbildung 1.

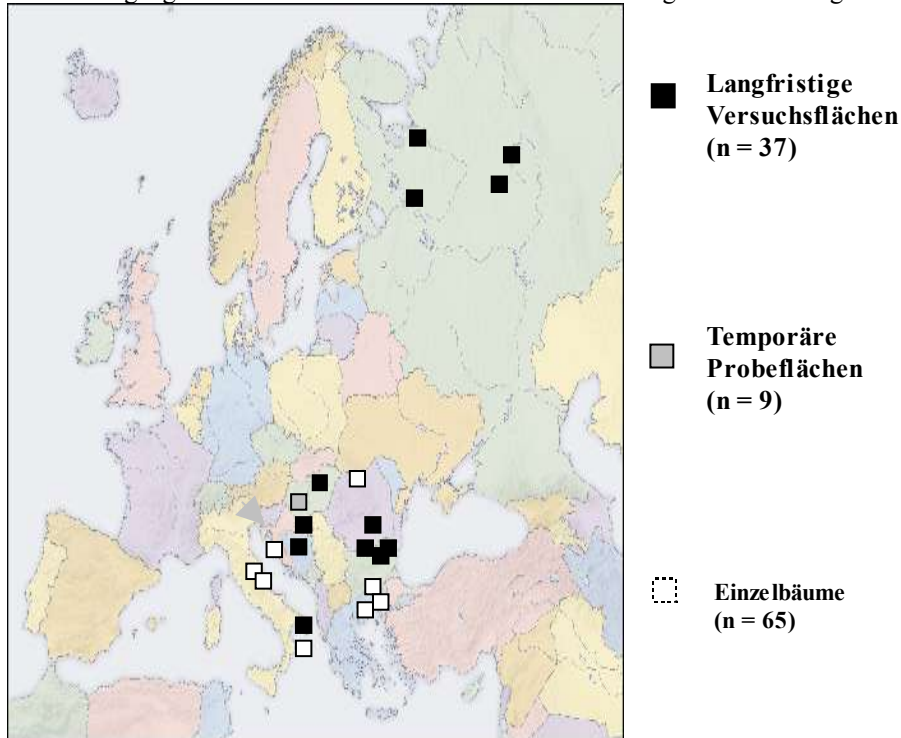


Abbildung 1: Lage der Untersuchungseinheit und geografische Herkunft des Materials Kartengrundlage: http://commons.wikimedia.org/wiki/Image:Europe_countries_map.png

Die Kartenskizze illustriert die geografische Herkunft des verwendeten Materials, dessen überwiegender Teil aus Südwestdeutschland stammt. Ein bedeutender Anteil hiervon entstammt **13 Versuchsanlagen** mit insgesamt **37 Einzelparzellen** des **Versuchsflächennetzes der Abteilung Waldwachstum der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt (FVA) Baden-Württemberg**; drei weitere Parzellen, die bei BOERNER (1997; S. 5 ff.) näher beschriebenen Versuchsflächen Buche 24 -26 im ehem. Forstamt Ehingen, gingen ein, die bereits vor längerer Zeit aus dem langfristigen Versuchsflächennetz der FVA Baden-Württemberg entlassen wurden. Die Versuchsanlagen bzw. Parzellen wurden anhand des verfügbaren Umfangs der Aufnahmeparameter ausgewählt (vgl. Kap. 3.2): Parzellen beziehungsweise Aufnahmen wurden dann berücksichtigt, wenn Messungen der Baum-, Kronenansatz- und Totast-Ansatzhöhen nach dem nachfolgend beschriebenen Verfahren vorlagen. Davon unabhängig erfolgte die Materialauswahl auch im Hinblick auf die Kronenbreite: Die Einzelbaum-bezogenen Messungen wurden für Aufnahmezeitpunkte berücksichtigt, an denen $d_{1,3}$ und Baumhöhe gemessen sowie eine terrestrische Kronenablotung nach dem bei SPIECKER (1991) beschriebenen Verfahren erfolgte. In geringerem Umfang flossen darüber hinaus Daten aus **3 langfristigen Buchen-Versuchsflächen in Rheinland-Pfalz** ein. Kronenablotungen lagen hier nur für Ausleseebäume vor; an einer Versuchsanlage mit 5 Parzellen wurden Messungen des Kronenansatzes und der astfreien Schaftlänge vom Verfasser im Herbst 2007 durchgeführt. Nicht zuletzt wurden auf **9 räumlich eng benachbarten, temporären Probeflächen** im Wuchsgebiet **Oberes Mittelrheintal** (Rheinland-Pfalz, Forstamt Boppard) weitere eigene Messungen durchgeführt. Im Rahmen einer Vorstudie wurden 7 temporäre Probeflächen im Winter 2005/2006 aufgenommen, die auf den übrigen beiden Flächen in der Wintersaison 2007/2008 durchgeführten Aufnahmen dienten der Ergänzung der Datenbasis. Auf Grund der Versuchssteuerung von herausragender Bedeutung sind schließlich die Daten von **4 dänischen Buchenversuchsflächen**, die Alter zwischen 20 und 140 Jahren aufweisen und sämtlich Parzellen mit früh einsetzender, konsequenter starker Durchforstung aufweisen (BRYNDUM 1987, HOLMSGÅRD 1985). Schließlich standen neben den Versuchsflächendaten Daten von 65 Buchen zur Verfügung, die bei KLÄDTKE (2002)(n= 61) sowie VANCK & SPIECKER (2004) (n=4) detailliert beschrieben sind. Es handelt sich um besonders großkronige Einzelbäume aus Baden-Württemberg, Rheinland-Pfalz, dem Saarland und Lothringen.

3.1 Methoden

Im Hinblick auf die Zielsetzung der Untersuchung und den angestrebten Geltungsbereich der Modelle, wurde die Besetzung des Altersspektrums zwischen 0 und 120 (140) Jahren mit Bäumen unterschiedlicher Standorts- und Standraumverhältnisse angestrebt. Im Falle der temporären Probestandflächen erfolgte zunächst eine Vorklärung anhand der Unterlagen der mittelfristigen Betriebsplanung. In die engere Wahl wurden reine Buchenbestände (Mischbaumarten < 5 % der Stammzahl) gezogen, die innerhalb der letzten Dekade keine Eingriffe und eine gewissen Durchmesser- bzw. Standraumspreitung aufwiesen. Die Größe und Lage der eigentlichen Aufnahmenfläche wurde so orientiert, dass sie mindestens 30 Buchen der KRAFT'schen Klasse 1 – 4 (KRAFT 1884) einschloss. Am stehenden Untersuchungsbaum wurden die räumliche Lage (Theodolit), Brusthöhendurchmesser (Umfangmaßband), soziale Baumklasse nach KRAFT und Baumhöhe (Forestor Vertex ® III) erfasst. Darüber hinaus wurden die Kronenansatzhöhe¹ und die astfreie Schaftlänge² erfasst, wobei die unterdrückten Individuen (Kraft'sche Klasse 5) unberücksichtigt blieben. Die Kronenschirmflächen der mindestens mitherrschenden Individuen (Kraft'sche Klassen 1 – 3) wurden nach dem bei SPIECKER 1991 beschriebenen Verfahren (Suunto Klinometer & Bussole; Forestor Vertex ® III) ermittelt. In der Regel wurden 8 Kroneneckpunkte erfasst; in Jungbeständen gestaltete sich dies schwierig, so dass hier 6 bzw. im Fall einer Versuchsanlage auch 4 Eckpunkte abgelotet und erfasst wurden. Die Ermittlung der Kronenschirmflächen erfolgte auf der Basis des Dreiecksmodells; als Kronenbreite des Baumes wird der Durchmesser des Kreises mit dem Flächeninhalt der 4, 6 bzw. 8 Teildreiecke angenommen.

Sofern für langfristige Versuchsflächen die integriert werden sollten die o.g. Informationen nicht zur Verfügung standen oder die Übereinstimmung der Aufnahmemethodik nicht zweifelsfrei geklärt werden konnte, wurden eigene Aufnahmen mit den oben beschriebenen Verfahren durchgeführt. Im anderen Fall wurden die interessierenden Daten in die Datenbasis integriert. Die Auswertung erfolgte mit Hilfe des frei verfügbaren Statistikpaketes R (VENABLES & SMITH 2007).

Die nachfolgende Tabelle 1 gibt einen Überblick über den Wertebereich der Aufnahmeparameter in dem Untersuchungsmaterial.

Tabelle 1: Umfang und Wertebereiche der wichtigsten Dimensions- und Zustandsgrößen des Untersuchungsmaterials

Parameter	N	arithm. Mittel	Std.-Abw.	Min.	Max.
Baumalter [Jahre]	3077	71,6	29,2	16	206
d _{1,3} [cm]	3077	29,0	15,3	1,2	115,0
Kronenbreite [m]	2295	5,9	3,1	0,5	21,3
Höhe [m]	3077	24,7	7,7	3,6	44,0
Kronenansatzhöhe [m]	1700	10,4	4,3	0,3	23,4
Höhe des untersten Totastes [m]	1700	8,5	5,0	0,0	23,4

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Höhe des Kronenansatzes und astfreie Schaftlänge

Die Höhe des Kronenansatzes kann bei gegebenen Baumdimensionen ebenso wie die Kronenbreite (vgl. Abschnitt 4.2) als Indikator für die Kronendimension in vertikaler Richtung gelten. Als Modelltyp wurden daher die in den Arbeiten von SPIECKER (1991), NUTTO (1999) und HEIN (2004) erfolgreich für die heimischen Eichen-Arten sowie für Esche und Bergahorn eingesetzten multiplen linearen Regressionsmodelle mit Baumdimensions-Parametern als unabhängige Variablen eingesetzt. Die Modellformulierung für die Höhe des Kronenansatzes und die astfreie Schaftlänge wurden identisch nach folgender allgemeiner Formulierung gewählt:

$$h_{kr}(d_{1,3}, t, h) = a + b \times d_{1,3} + c \times t + d \times h \quad (\text{Gleichung 1a})$$

$$h_{af}(d_{1,3}, t, h) = a + b \times d_{1,3} + c \times t + d \times h \quad (\text{Gleichung 1b})$$

mit:

- h_{kr} = Kronenansatzhöhe, i.e. die Höhe des untersten lebenden Primärastes (vgl. Abschnitt 3.1) [m]
- h_{af} = Astfreie Schaftlänge, i.e. die Höhe des untersten vom boden sichtbaren (lebenden oder toten) Primärast (vgl. Abschnitt 3.1) [m]
- d_{1,3} = Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3 m Höhe [cm]
- t = tatsächliches Baumalter [Jahre]
- h = Baumhöhe [m]
- a,b,c,d = Koeffizienten.

Die Verlagerung des Kronenansatzes ist, wie Beobachtungen an Solitären verdeutlichen (HASENAUER 1997, FREISE & SPIECKER 1999), keineswegs zwangsläufig mit der Veränderung der Dimensionsgrößen gekoppelt

¹ Die Kronenansatzhöhe [m] wurde als Höhe des Ursprungs des untersten lebenden Primärastes im Mark definiert.

² Als astfreie Schaftlänge wird die Höhe [m] bis zum untersten, vom Boden aus sichtbaren lebenden oder toten Primärast bezeichnet.

sondern wird im wesentlichen von der Konkurrenz zwischen Bestandesbäumen gesteuert. In der hier vorgestellten Arbeit wurde in Analogie zu den Arbeiten von SPIECKER, NUTTO und HEIN (a.a.O.) der Baumdurchmesser als hoch integrierter Indikator für die bisherigen Konkurrenzverhältnisse gewählt.

Mit dem in Gleichungen 1a und 1b dargestellten Modellansatz konnten 71 % (Kronenansatzhöhe) bzw. 73 % der (astfreie Schaftlänge) der Streuung erklären. Die Ergebnisse der Parameterschätzung sowie der Varianzanalyse sind in den nachfolgenden Tabellen für das Kronenansatzmodell (Tabelle 2) bzw. Modell für die astfreie Schaftlänge (Tabelle 3) wiedergegeben.

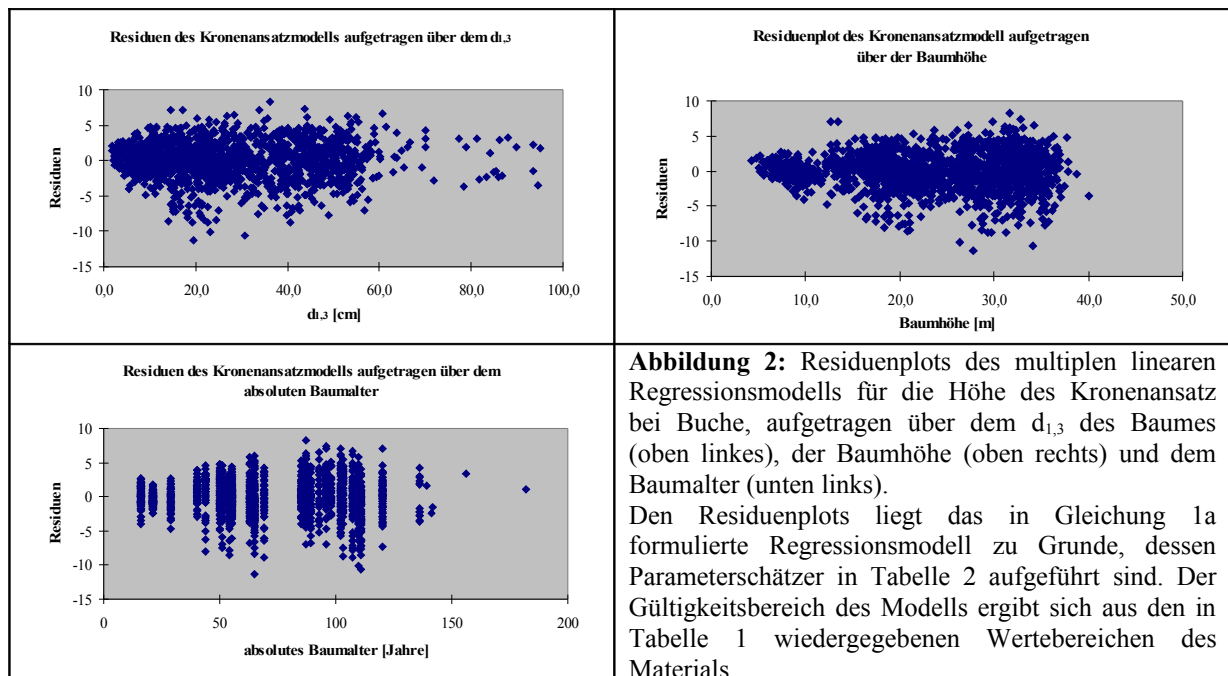
Tabelle 2: Ergebnisse der Regressionsanalyse und der Varianzanalyse des Kronenansatzmodells (Gleichung 1a) für Buche. $N = 1700$, $r^2 = 0,7149$, $r^2_{\text{adj.}} = 0,7144$, $F = 1417,88$; $F_{\text{krit.}} = 0$

Variable	Koeffizienten (Gleichung 1a)	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	Signifikanz zum Niveau $\alpha = 0,0001$
Intercept [-]	a	-1,7631	0,2026	*
d _{1,3} [cm]	b	-0,1595	0,0074	*
Baumhöhe [m]	c	0,6949	0,0183	*
Baumalter [Jahre]	d	0,0086	0,0038	*

Tabelle 3: Ergebnisse der Regressionsanalyse und der Varianzanalyse des Modells zur Schätzung der astfreien Schaftlänge (Gleichung 1b) für Buche. $N = 1700$, $r^2 = 0,7314$, $r^2_{\text{adj.}} = 0,7309$, $F = 1539,66$; $F_{\text{krit.}} = 0$

Variable	Koeffizienten (Gleichung 1b)	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	Signifikanz zum Niveau $\alpha = 0,0001$
Intercept [-]	a	-3,7979	0,2045	*
d _{1,3} [cm]	b	-0,1028	0,0074	*
Höhe [m]	c	0,5630	0,0185	*
Alter [Jahre]	d	0,0316	0,0039	*

Wie für die Höhe des Kronenansatz konnten auch für die astfreie Schaftlänge eine zufrieden stellende Anpassung des Modells (Gleichung 1 b) an den Datensatz erfolgen. Die Ergebnisse der Modellanpassung sind in der nachfolgenden Tabelle 3 zusammengefasst. Die hier nicht dargestellten Residuen zeigten auch bei der astfreien Schaftlänge keine Auffälligkeiten in der Variation der Reststreuung.



In Abbildung 2 sind die Residuen des Kronenansatzmodells jeweils über den unabhängigen Variablen $d_{1,3}$, Baumhöhe und Baumalter aufgetragen. Es herrscht eine gleichmäßige Streuung der Residuen über den gesamten Wertebereich hinweg vorzuherrschen, so dass das gewählte Modell zur Prognose der Höhe des Kronenansatzes grundsätzlich auch für die Baumart Buche geeignet zu sein scheint.

4.2 Kronenbreite

Wie für zahlreiche andere Baumarten (exemplarisch: ASSMANN 1961, FRANCIS 1988, SPIECKER, NUTTO, HEIN (a.a.O.)), wird auch für die Buche in der Literatur ein straffer Zusammenhang zwischen Kronenbreite und Brusthöhdendurchmesser beschrieben (EULE 1959, FREIST 1962, HAHN 1995, KLÄDTKE 2002, SCHRÖDER, GEROLD & RÖHLE 2005). In Anlehnung an die von NUTTO (1999, S. 39 ff.) und HEIN (2004, S. 110 ff.) verwendeten Modellformulierungen wurde ein multiples lineares Modell der Form:

$$Kb(d_{1,3}, t, h) = a + b \times d_{1,3} + c \times t + d \times h \quad (\text{Gleichung 2})$$

gewählt, mit:

- Kb = Kronenbreite (=Kronendurchmesser) [m]
- $d_{1,3}$ = Schaftdurchmesser (mit Rinde) in 1,3 m Höhe [cm]
- t = tatsächliches Baumalter [Jahre]
- h = Baumhöhe [m]
- a,b,c,d = Koeffizienten

Tabelle 4 zeigt die Ergebnisse der Regressions- und Varianzanalyse für das multiple lineare Regressionsmodell der Buche, mit dem 86 % der individuellen Variation erklärt werden können.

Tabelle 4: Ergebnisse der Regressionsanalyse und der Varianzanalyse des Modells zur Schätzung der Kronenbreite (Gleichung 2) für Buche. N = 2207, $r^2 = 0,8608$, $r^2_{\text{adj.}} = 0,8606$, F = 4544,33; $F_{\text{krit.}} = 0$

Variable	Koeffizienten (Gleichung 2)	Parameterschätzer	Standardfehler des Schätzers	Signifikanz zum Niveau $\alpha = 0,0001$
Intercept [-]	a	1,1906	0,0897	*
$d_{1,3}$ [cm]	b	0,2130	0,0033	*
Baumalter [Jahre]	c	-0,0173	0,0011	*
Baumhöhe [m]	d	-0,0252	0,0064	*

Ein Vergleich des Altersspezifischen Koeffizienten c mit den von SPIECKER, NUTTO (a.a.O.) für Stiel- und Traubeneiche bzw. HEIN (a.a.O.) für Esche und Bergahorn vorgestellten Ergebnissen verdeutlicht, dass die Kronenbreite der Buche in dem untersuchten Alters- und Dimensionsrahmen am wenigsten von der Wuchsgeschwindigkeit modifiziert wird. Dies bedeutet, dass die Kronenschirmfläche von Buche im Wesentlichen vom Durchmesser des Baumes determiniert wird und ein rascheres Wachstum nur in geringem Maß mit einer vergrößerten Schirmfläche in Verbindung stehen könnte.

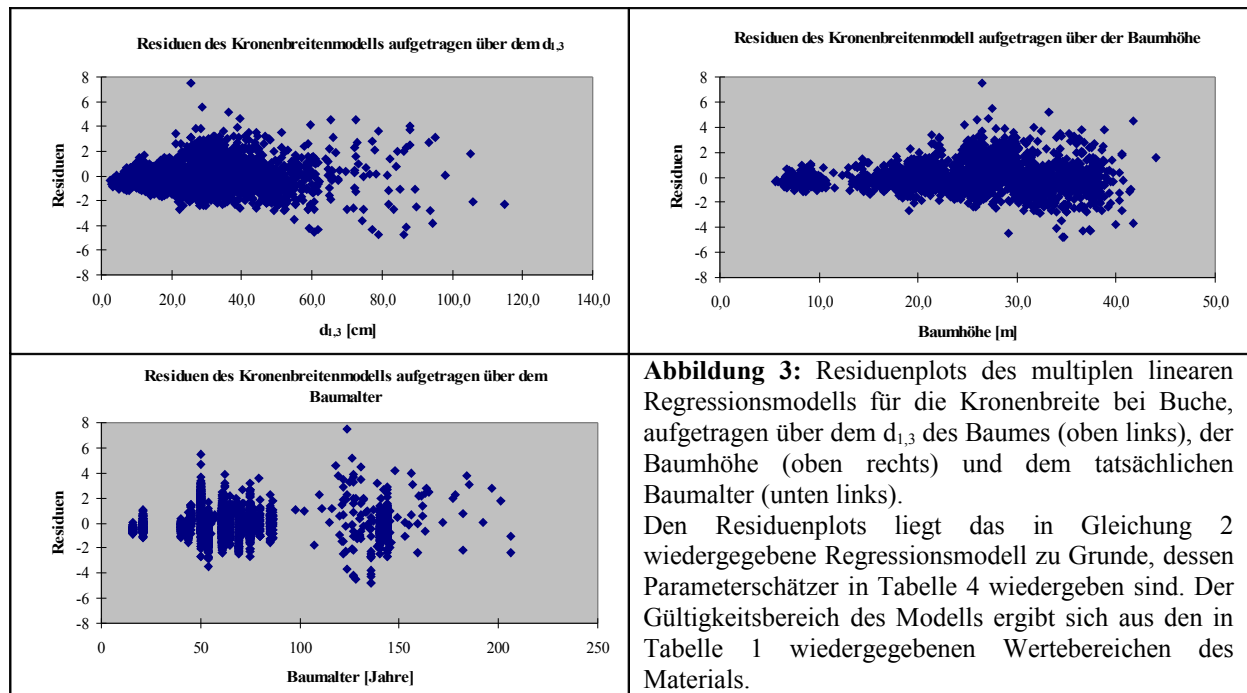


Abbildung 3 stellt die Residuen des Kronenbreitenmodells jeweils über den unabhängigen Variablen $d_{1,3}$, Baumhöhe und Baumalter aufgetragen dar. Wie auch bei dem weiter oben vorgestellten Kronenansatzmodell bzw. dem Modell für die astfreie Schaftlänge erscheint die gewählte Form eines multiplen linearen Modells angesichts der gleichmäßigen Streuung der Residuen dem Material angepasst.

4.3 Anzahl an Auslesebäumen

Die in Abschnitt 4.2 vorgestellten Ergebnisse zum Zusammenhang zwischen Brusthöhendurchmesser und Kronenschirmfläche erlauben eine Abschätzung des Standraumanspruchs in Abhängigkeit von Einzelbaummerkmalen, sofern die Zusammenhänge zwischen Kronenschirmfläche und Standfläche, d.h. dem zusätzlich zur Kronenschirmfläche von den Bäumen beanspruchten Standraum, bekannt sind. In der Studie von HAHN (1995) ergaben Vergleichskalkulationen mit den dort untersuchten Konkurrenzindex-orientierten Modellansätzen bei einem Überschirmungsgrad von rd. 80 % gute Übereinstimmungen, so dass diese Größenordnung als vorläufige Berechnungsgrundlage für die Abschätzung der flächenbezogenen Auslesebaum-Anzahl gerechtfertigt erscheint. In der nachfolgenden Tabelle 5 sind für einen produktiven Standort ($h_0 = 34$ m) die Alter von 120 Jahren möglichen Auslesebaumzahlen in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Durchmesserzuwachs angegeben, wobei eine gleichmäßige Verteilung der Bäume sowie die vollständige Flächenübernahme durch die Auslesebäume unterstellt wurden.

Tabelle 5: Mögliche End- (= Auslese- bzw. Z-)Baumzahlen pro ha bei einem 120 jährigen Produktionszeitraum und einem Überschirmungsgrad von 80 % in Abhängigkeit vom durchschnittlichen Durchmesserzuwachs.

Durchschnittlicher Durchmesserzuwachs i_d [mm/a]	2	3	4	5	6	8	10
Kronenbreite [m]	3,4	5,9	8,5	11,0	13,6	18,7	23,8
Auslesebaum-Anzahl [1/ha]	897	290	142	84	55	29	18

Diese vorläufigen Ergebnisse der Studie bestätigen im Wesentlichen die Angaben aus der Literatur. So weichen die bei HAHN (1995) für Ziel- $d_{1,3}$ von 60 bzw. 70 cm in 120 Jahren genannten Auslesebaumzahlen mit 79 bzw. 55 nur geringfügig von den oben vorgestellten ab. Auch die Ergebnisse von GUERICKE (2002), KLÄDTKE (2001) und KLÄDTKE (2002) stimmen gut mit den in dieser Studie erzielten Ergebnissen überein.

5 Diskussion und Ausblick

Die hier erzielten Ergebnisse stimmen im Wesentlichen mit den Angaben aus der Literatur bei „praxisüblichen“ Zieldurchmessern zwischen rd. 50 und 70 cm überein (KLÄDTKE 2002, UTSCHIG 2000, GUERICKE 2002).

Abweichend von den vorstehend zitierten Autoren ergaben sich in der vorliegenden Studie Hinweise darauf, dass die maximal erreichbaren Kronenschirm- bzw. Brusthöhendurchmesser von Buchen bislang eher zu pessimistisch eingeschätzt worden sind. Obwohl die WILHELM, LETTER & EDER (1999) unterstellten Durchmesserwachstums-Potenziale (UTSCHIG (2002) nicht ganz erreicht werden, erscheinen die Ergebnisse der Modellierung sowohl innerhalb des hier verwendeten Materials plausibel als auch mit Literaturangaben zum Wachstum konkurrenzfrei bzw. konkurrenzarm erwachsener Buchen vergleichbar (HASENAUER, STAMPFER, ROHRMOSER & STERBA 1994, HASENAUER 1997, FREISE & SPIECKER 1999, VANCK & SPIECKER 2004). Beim Vergleich mit den Arbeiten von SPIECKER, NUTTO und HEIN (a.a.O.), die zur Modellierung der Kronenbreiten von Eichen-Arten bzw. Esche und Bergahorn identische Funktionstypen zur Modellierung des Zusammenhangs zwischen Schaftdurchmesser und Kronenbreite verwendeten fällt auf, dass von den genannten bei der Baumart Buche der Einfluss der Wachstumsgeschwindigkeit auf die Kronenbreite am geringsten ausfällt. Konkret bedeutet dies, dass die Kronenbreite der Buche im untersuchten Altersbereich bis 140 Jahre in weit geringerem Umfang von der durchschnittlichen Wachstumsgeschwindigkeit abhängig ist. Welche Schlüsse sich aus diesem Befund für den Standraumbedarf und die flächenbezogenen Produktivität unterschiedlich rasch erwachsener Buche ergeben, bedarf weiterer Untersuchungen im Hinblick auf die Form- bzw. Volumenverhältnisse.

Mit dem vorgestellten multiplen linearen Modellen zur Prognose von astfreier Schaftlänge bzw. Kronenansatzhöhe stehen geeignete Instrumente zur Abschätzung dieser Größen an Bäumen bekannten Alters bzw. bekannter Höhe und Durchmesser zur Verfügung, so dass insbesondere der Endzustand der Auslesebäume - vorbehaltlich noch ausstehender Schritte zur Prüfung und Evaluation der Modelle – sicher prognostiziert werden kann. Inwieweit die Modelle für die Behandlungskonvention der „definitiv beendeten Astreinigung“, die allen hier untersuchten Behandlungsoptionen zu Grunde liegt, an ihre Grenzen stoßen und angepasst werden müssen wird derzeit geprüft. Über das in Kapitel 3.1 dargestellte Aufnahmeprogramm hinaus wurden Detailstudien zur Astbesetzung und Astverteilung innerhalb des Baumes an 70 Buchen durchgeführt. Innerhalb einer Untersuchungseinheit unterschieden sich die Bäume deutlich in der Lage des untersten lebenden Primärastes relativ zu den nächstgelegenen Nachbarästen. Bei einigen Bäumen wird die Kronenbasis von dislozierten Einzelästen gebildet, wobei der Abstand zum nächst höheren Ast beträchtlich sein kann. Versuche derartige Phänomene mit Einzelbaummerkmalen in Zusammenhang zu bringen waren bislang erfolglos. Die zurückbleibenden Äste leiden meist unter ungünstigen lichtökologischen Bedingungen, da stammaufwärts inserierte Äste eine größere Länge, Dicke und Ausladung aufweisen und den Lichtgenuss über die nachbarschaftliche Konkurrenz hinaus zusätzlich schmälern. Die in Abhängigkeit vom Baumzustand modellierten Kronenparameter stellen als Momentaufnahmen der Astreinigungsdynamik insofern nicht zwangsläufig einen mittelfristig stabilen oder stabilisierbaren

Kronenansatz-Zustand dar, so dass eine „prospektive“ Fortschreibung der Baumentwicklung bei konstanter Kronenansatzhöhe zu Fehleinschätzungen führen kann. Daher wird in der weiteren Auswertung ein retrospektiver Ansatz gewählt, der ausgehend vom End- bzw. Zielzustand auf standortsspezifischen h/d-Entwicklungen basiert. In diesem Zusammenhang ist nochmals kritisch auf die Materialauswahl hinzuweisen, denn theoretisch hätte den Unsicherheiten im Hinblick auf die Zusammengehörigkeit von Bäumen innerhalb einer Entwicklungsreihe durch die gezielte Auswahl von Bäumen mit langer Zeit konstanter Kronenbasis begegnet werden können (vgl. etwa die Untersuchung von KLÄDTKE 2002). Da aus praktischen Gesichtspunkten diese Vorgehensweise nicht praktikabel erschien und zudem auch bei sorgfältiger Auswahl die Entwicklung in weiter zurückliegenden Perioden mit nicht-destruktiven Methoden nicht mehr zuverlässig angesprochen werden kann, muss es weiterführenden Studien vorbehalten bleiben, die Anpassung der hier gewonnenen waldwachstumskundlichen Modelle an entsprechendem Datenmaterial zu überprüfen.

6 Zusammenfassung

Viele Indizien deuten darauf hin, dass die Buche (*Fagus sylvatica* L.) auf Grund der zunehmender Anbaufläche und steigenden Nutzungspotenzials sowie des steigenden Interesses an ihren ökologischen Wirkungen bzw. Leistungen in vielen Forstbetrieben zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen wird. In diesem Kontext wird die Frage nach der optimalen Behandlung aufgeworfen. Am Beispiel der rezenten Diskussion über Pflegekonzepte der Buche ist in Übereinstimmung mit Zeide (2001) festzustellen, dass im forstbetrieblichen Bereich der Holzproduktion heute die Wert-Produktionsleistung das Optimierungsziel darstellt und demgegenüber weder eine ausschließliche Orientierung an der Volumen-Wuchsleistung (d.h. des Produktionsvolumens pro Zeit- und Flächeneinheit) bzw. der Qualität (und damit implizit des Produktionswertes pro Mengeneinheit) Erfolg versprechend sein kann. Da der letztgenannte Aspekt im Hinblick auf die Langfristigkeit der Produktionszeiträume im Besonderen der Unsicherheit unterliegt, ist es für die Praxisrelevanz von Optimierungsüberlegungen notwendig (wenn auch nicht hinreichend), diesem Umstand durch eine Analyse der Sensitivität gegenüber divergierenden zukünftigen Preis-Szenarien Rechnung zu tragen.

Ausgehend von den gewünschten Eigenschaften des Holzes am Ende der Produktionszeit, i.e. stark dimensioniertes und farbkernfreies Holz mit breiten astfreien Mantelschichten, wird allen hier untersuchten Behandlungsoptionen ein zweiphasiges Pflegekonzept zu Grunde gelegt, das sich durch eine definitive Trennung der anfänglichen Astreinigungphase von der zweiten Phase eines beschleunigten Kronen- und Durchmesserwachstums auszeichnet. Als Parameter zur Charakterisierung der jeweiligen Optionen dient die astfreie Schaftlänge (bzw. die relative Kronenlänge) zum Ende der Produktionszeit. Die Auswahl dieses Parameters erfolgte auf Grund der Skalierung (metrische Variable) und insbesondere der bereits von anderen Autoren bestätigten Eignung als Steuerungsgröße für die bewertungsrelevanten Wachstumsprozesse und Qualitätsmerkmale (SPIECKER 1991). Ein wesentlicher Teil des Datenmaterials zur vorliegenden Untersuchung entstammt langfristigen Buchen-Versuchsflächen; dieser Grundstock wurde durch eigene Erhebungen auf temporären Probestellen sowie Einzelbaumdaten aus zwei Projekten anderer Autoren ergänzt. Als besonders wertvoller Teil des Untersuchungsmaterials sind vier dänische Versuchsanlagen zu nennen, die Bäume mit standraumbetontem Entwicklungsgang enthielten und damit den unterstellten Behandlungsgrundsätzen gut entsprachen. Erste Ergebnisse der waldwachstumskundlichen Modellentwicklung werden vorgestellt. Für die Prognose des **Kronenansatzes** und der **astfreien Schaftlänge** lieferte ein multiples lineares Modell mit den unabhängigen Variablen Baumhöhe, Durchmesser und Alter gute Anpassungsergebnisse. Der Zusammenhang zwischen **Schaftdurchmesser** in Brusthöhe und der Kronenbreite von Buchen konnte ebenfalls mit Hilfe eines multiplen linearen Modells abgebildet werden. Bemerkenswert im Vergleich zu anderen Laubbaumarten ist dabei der Befund, dass die Kronenbreite bei gegebenem Durchmesser signifikant aber nur in geringem Maße von der Wachstumsgeschwindigkeit abhängig ist. Als Faustwert für die Kronenbreite kann der 20-fache Schaftdurchmesser in Brusthöhe genannt werden. Sollte sich die in anderen Untersuchungen festgestellten Überschirmungsgrade von Buchenbeständen von rd. 80 % der Fläche bestätigen, leiten sich hieraus **Auslese-Baumzahlen pro Hektar** von 30 (mittlerer $i_d = 8$ mm) bis 140 Bäumen (mittlerer $i_d = 4$ mm) im Alter von 120 Jahren ab. Zusammenfassen zeigt sich, dass, in der (deutschsprachigen!) Literatur die maximale **Durchmesserentwicklung** von Buchen bislang pessimistischer eingeschätzt wurde, als sich dies auf der Basis dänischer und französischer Buchen-Versuchsergebnisse darstellt (BRYNDUM 1987, CZUDEK 1998). Das Astreinigungsmodell wird in Verbindung mit dem unterlegten Höhen- und Dickenwachstum des Baumes Rückschlüsse auf die inneren Astigkeitsmerkmale der Ausleseebäume ermöglichen und damit eine behandlungssensitive monetäre Bewertung der Zielsortimente unterschiedlicher Produktionsoptionen zulassen. Eine Übertragung der Gesetzmäßigkeiten vom Einzelbaum auf Flächeneinheiten ist auf Grund der Kenntnis der Standraumanprüche der Bäume ohne Schwierigkeiten möglich, so dass schließlich die bewertungsrelevanten naturalen Kenngrößen sowohl für die „Volumen-Leistung“ als auch die „Qualitätskomponente“ zur Verfügung gestellt werden können. Es wird vermutet, dass der Zusammenhang zwischen der Wertleistung und der astfreien Schaftlänge einer Optimumkurve folgt, d.h. ein Maximum innerhalb der Modellgrenzen aufweist.

7 Summary

Several indications suggest that European beech (*Fagus sylvatica* L.) will play a major role in future forest management due to increasing demand of ecological services as well as the increasing area and harvesting potential. Again, the question upon the optimum management regime of European beech arises,

According to ZEIDE (2001) one can conclude for European beech that foresters and forest owners are today mostly interested in the optimization of value production and maximizing either volume or quality alone seems to be not the optimum approach. Since especially wood prices are uncertain over especially long production times in forestry but have major influence in optimization approaches an adequate way to account for price uncertainty seems to be sensitivity analysis for a wide set of different price scenarios. Starting with the requirements for high quality European beech timber, i.e. mostly large diameter, absence of (facultative) coloured heart and wide branch free mantles of clear wood, a joint feature of the management options the study deals with is a so called “two-phased management concept”, i.e. characterised by a distinct differentiation of an initial phase of natural pruning from a subsequent phase of accelerated crown development and diameter growth. This means that natural pruning is definitively stopped when the desired clear bole length is reached and at least as much growing space is attributed to the trees as required to leave the lowest branches alive. As an indicator or identifier of the different management options, the clear bole length relative of the top height trees at the end of the respective production time is recommended. The indicator has been selected due to the metric scaling and the results of former studies, confirming the growing space to be an adequate indicator to control diameter growth and quality development. Most of the empirical material analysed for this study originates from long term scientific research plots, which were completed by own temporary plots and single tree measurement. The most important data to account for and to adapt to the management scenarios as shown above was a dataset consisting of 4 research experiment from Denmark consisting of altogether 22, which contained most of the trees of large growing space and thus accelerated diameter growth. Methods of data collection and an overview of the different datasets employed in this study are presented as well as first results.

For the prediction of height to crown base (i.e. the height to the lowest living primary branch, equation 1a) and the clear bole height (i.e. the height to the lowest living or dead branch visible from the ground, equation 1b) a multiple linear model provided good results, employing diameter at breast height ($d_{1,3}$), tree height (h) and age (t) as independent variables. Regarding the model residuals it is noticeable, that there is a remarkable number of residuals with high absolute value below the zero level, which could probably be attributed to the high shade tolerance of European beech. For the relationship between crown and $d_{1,3}$, height, and age also an multiple linear model has been employed successfully (equation 2, table 4). In comparison to other broadleaved species the age-specific coefficient indicates a less pronounced influence of age, modifying the stem-/crown-diameter relationship. As a rule of thumb with European beech this relationship is abt. 1:20. Based on a crown coverage of 80 % provisional calculations on the potential number of future crop trees are presented on a high productive site (top height = 34 m) at an age of 120 years (table 5). Whereas the results for “normally grown” trees correspond to former studies it is shown that in the German-speaking literature the maximum diameter growth is often underestimated whereas the potential crown and bole dimensions presented in this study are confirmed by former studies from Denmark and France.

8 Danksagung

Der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg – Abteilung Waldwachstum – gebührt Dank für die Bereitstellung umfangreichen Datenmaterials langfristiger Versuchsflächen. Darüber hinaus danken wir Prof. Dr J.P. Skovsgaard (Forest & Landscape Denmark / The University of Copenhagen) für sein Einverständnis zu eigenen Erhebungen auf den Versuchsflächen. Landesforsten Rheinland-Pfalz gebührt besonderer Dank für die Bereitstellung von Versuchsflächendaten und die Bereitstellung des Verfassers.

9 Literatur

- ALTHERR, E. (1971): Wege zur Buchen-Starkholzproduktion. Vortrag anlässlich der 100-Jahrfeier der FVA Baden-Württemberg am 08.06.1971 in Freiburg. 5 S.
- ASSMANN, E. (1961): Waldertragskunde. München: BLV Verlagsgesellschaft. 490 S.
- BOERNER, M. (1997): Zu Wachstum und Wachstumsreaktion der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) nach Freistellung im fortgeschrittenen Alter. Lincom Studien zur Forstwissenschaft 03. Lincom. 197 S.
- BRYNDUM, H. (1987): Buchendurchforstungsversuche in Dänemark. Allgemeine Forst- und Jagd Zeitung 158, S. 115–121.
- CZUDEK, R. (1998): Modélisation de la croissance individuelle du hêtre (*Fagus sylvatica* L.) dans different conditions de densité locale et de milieu. Thèse doctorat. ENGREF Nancy. 116 S.
- EULE, H.-W. (1959): Verfahren zur Baumkronenmessung und Beziehung zwischen Kronengröße, Stammstärke und Zuwachs bei Rotbuche, dargestellt an einer nordwestdeutschen Durchforstungsversuchsfläche. Allgemeine Forst- und Jagd Zeitung 130, S. 185–201.
- FRANCIS, J. K. (1988): The Relationship of Bole Diameters and Crown Widths of Seven Bottomland Hardwood Species. USDA Forest Service Research Note SO-328. New Orleans: USDA Forest Service Southern Research Station. 3 S.

- FREISE, C.; SPIECKER, H. (1999): Konkurrenzfreies Wachstum der Buche. *Allgemeine Forst Zeitschrift / Der Wald*, S. 1346–1349.
- GUERICKE, M. (2002): Untersuchungen zur Wuchsdynamik der Buche. *Forst und Holz* 57 (11), S. 331–337.
- HAHN, D. (1995): Entscheidungshilfen für die Steuerung des Dickenwachstums von Buchen (*Fagus sylvatica* L.). Dissertation. Albert-Ludwigs-Universität. Freiburg i. Brsg. 225 S.
- HASENAUER, H.; STAMPFER, E.; ROHRMOSER, C.; STERBA, H. (1994): Solitärdimensionen der wichtigsten Baumarten Österreichs. *Österreichische Forstzeitung*. (3), S. 28–29.
- HASENAUER, H. (1997): Dimensional relationships of open-grown trees in Austria. *Forest Ecology and Management* 96, S. 197–206.
- HECK, C. R. (1931): *Handbuch der freien Durchforstung*. Stuttgart: E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung. 343 S.
- HEIN, S. (2004): Zur Steuerung von Astreinigung und Dickenwachstum bei Esche (*Fraxinus excelsior* L.) und Ahorn (*Acer pseudoplatanus* L.). *Freiburger Forstliche Forschung* 25, Freiburg: Forstwissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität & Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. 263 S.
- HOLMSGAARD, E. (1985): Oprensning, vandrissdannelse M.V. i en 25-ars periode pa en urort og to tyndede parceller i et Hugstforsoeg i boeg. *Forstlige Forsgsvaesen i Danmark* 40 (1), S. 1–51.
- KLÄDTKE, J. (2001): Konzepte zur Buchen-Lichtwuchsdurchforstung. *Allgemeine Forst Zeitschrift / Der Wald*. (20), S. 1047–1050.
- KLÄDTKE, J. (2002): Wachstum großkroniger Buchen und waldbauliche Konsequenzen. *Forstarchiv* 73, S. 211–217.
- KRAFT, G. (1884): *Beiträge zur Lehre von den Durchforstungen, Schlagstellungen und Lichtungshieben*. Hannover: Klindworth's Verlag. 147 S.
- MICHAELIS (1935): Wie bringt Durchforsten die größere Stärken- und Wertzunahme des Holzes ? Neudamm: Neumann. 43 S.
- NOBBE, F. (1877): Forstliches Versuchswesen. in: KUEHN, G.; NOBBE, F.: *Entwicklung und Thätigkeit der land- u. forstwirtschaftlichen Versuchs-Stationen in den ersten 25 Jahren ihrer Bestehens*. S. 258–284.
- NUTTO, L. (1999): Neue Perspektiven für die Begründung und Pflege von jungen Eichenbeständen. *Freiburger Forstliche Forschung* Bd. 5. Freiburg i. Brsg: Forstwissenschaftliche Fakultät der Albert-Ludwigs-Universität & Forstliche Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg. 190 S.
- SCHRÖDER, J.; GEROLD, D.; RÖHLE, H. (2005): Modellierung der Kronenbreite in BWINPro-S für die Anwendung in strukturreichen Beständen. in: NAGEL, JÜRGEN (Hrsg.): *Jahrestagung der Sektion Ertragskunde im DVFFA von 9. – 11. 05.2005 in Freising*, S. 33–40.
- SCHWAPPACH, A. (1904): *Geschichte des forstlichen Versuchswesens in Preußen*. Als Manuskript gedruckt für die Ausstellung der preußischen Staatsforstverwaltung zu St. Louis, Nordamerika. 43 S.
- SPELLMANN, H. (2005): Produziert der Waldbau am Markt vorbei? *Allgemeine Forst Zeitschrift / Der Wald*. (9), S. 454–459.
- SPIECKER, H. (1991): Zur Steuerung des Dickenwachstums und der Astreinigung von Trauben- und Stieleichen (*Quercus petraea* (Matth.) Liebl. und *Quercus robur* L.). Mitteilung der Landesforstverwaltung Baden-Württemberg 72. Stuttgart: Ministerium Ländlicher Raum, Ernährung, Landwirtschaft und Forsten Baden-Württemberg. 155 S.
- UTSCHIG, H. (2000): Wachstum vorherrschender Buchen in Abhängigkeit von Standort und Behandlung. *Forst und Holz* 55 (2), S. 44–50.
- UTSCHIG, H. (2002): Analyse der Standraumökonomie von Einzelbäumen auf langfristig beobachteten Versuchsflächen Methoden, Programmentwicklung und erste Ergebnisse. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 121, S. 335–348.
- VANCK, T. & SPIECKER, H. (2004): Rekonstruktion der Kronenentwicklung von Mittelwaldbuchen. *Allgemeine Forst- und Jagd Zeitung* 175. (9), S. 182–188.
- VENABLES, W. N. & SMITH, D. M. (2007): *An introduction to R. R Development Core Team*.
- WILHELM, G.-J.; LETTER, A. & EDER, W. (1999): Konzeption einer naturnahen Erzeugung von starkem Wertholz. *Allgemeine Forst Zeitschrift / Der Wald* (5), S. 232–240.
- ZEIDE, B. (2001): Thinning and Growth. *Journal of Forestry*. (1), S. 20–25.