

Christian Kleinschmit



Die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität

untersucht am Beispiel der
hochmechanisierten Aufarbeitung
von Buchenkronen



Universitätsverlag Göttingen

Christian Kleinschmit
Die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität

Dieses Werk ist lizenziert unter einer
[Creative Commons
Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen
4.0 International Lizenz.](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/)



erschienen im Universitätsverlag Göttingen 2015

Christian Kleinschmit

Die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität

untersucht am Beispiel der
hochmechanisierten Aufarbeitung
von Buchenkronen



Universitätsverlag Göttingen
2015

Bibliographische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliographie; detaillierte bibliographische Daten sind im Internet über <http://dnb.dnb.de> abrufbar.

Anschrift des Autors

Christian Kleinschmit

E-Mail: christian@kleinschmit.de

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades
an der Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie
der Georg-August-Universität Göttingen

1. Gutachter: Prof. Dr. Bernhard Möhring
 2. Gutachter: Dir. u. Prof. Prof. Dr. Matthias Dieter
- Tag der mündlichen Prüfung: 23.10.2014

Dieses Buch ist auch als freie Onlineversion über die Homepage des Verlags sowie über den Göttinger Universitätskatalog (GUK) bei der Niedersächsischen Staats- und Universitätsbibliothek Göttingen (<http://www.sub.uni-goettingen.de>) erreichbar.
Es gelten die Lizenzbestimmungen der Onlineversion.

Satz und Layout: Christian Kleinschmit

Umschlaggestaltung: Jutta Pabst

Titelabbildung: Christian Kleinschmit

© 2015 Universitätsverlag Göttingen

<http://univerlag.uni-goettingen.de>

ISBN: 978-3-86395-195-5

Den Eltern von acht Kindern

Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift wäre sicherlich nicht entstanden, wenn mich nicht viele Menschen im Laufe der Zeit am Lehrstuhl beruflich und privat unterstützt hätten. Einen ganz besonders großen Dank möchte ich meinem geschätzten Doktorvater Prof. Dr. Bernhard Möhring aussprechen. Durch die gemeinsame Verbundenheit zur forstlichen Wissenschaft und Praxis konnte mit der Dissertation „Die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität – am Beispiel der hochmechanisierten Aufarbeitung von Buchenkronen –“ ein Thema gefunden werden, welchen in beiden Gebieten eine hohe Bedeutung beigemessen wird und in deren Verknüpfung der besondere fachliche Reiz steckt. Dabei suchte er stets den fachlichen Diskurs und war mir bei den vielen, teils auch spontanen Fachdiskussionen immer ein äußerst geschätzter Gesprächspartner. Dabei hat er mich nicht selten mit seinen Ideen den entscheidenden Schritt weiter gebracht oder mich mit einem seiner bekannten Sprüche aufgemuntert. Einen herzlichen Dank für diese sehr intensive und stets positive Zusammenarbeit!

Für die Übernahme des Zweitgutachtens gilt mein besonderer Dank auch Dir. und Prof. Prof. Dr. Matthias Dieter, der trotz seines zuletzt deutlich vergrößerten Verantwortungsbereiches immer Zeit für den fachlichen Austausch bspw. bei den Doktorandenkolloquien gefunden hat. Dabei haben mir seine Forderungen nach einer klar strukturierten Vorgehensweise bei der Bewältigung dieses Themas sehr geholfen. Herrn Prof. Dr. Joachim Saborowski wiederum sei herzlich für die unentbehrliche statistische Beratung und die Übernahme des Drittprüfers bei der Disputation gedankt.

Meinen ausdrücklichen Dank möchte ich auch an die beiden Mitarbeiter der Nordwestdeutschen Versuchsanstalt Kai Husmann und Sabine Rumpf aussprechen. Trotz meiner unermüdlichen Rückfragen nahmen sie sich immer Zeit für mich und so verwandelte sich für mich selbst die durchaus komplizierte Methodik des Randomized-Branch-Sampling (RBS) oder die Programmierung in R zu einer handfesten und operationalen Materie. Hierbei sei zudem anzumerken, dass ohne die herausragende Masterarbeit von Kai Husmann, die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen sicher nicht so weit erforscht wäre.

Für die Bereitstellung der RBS-Datensätze sei der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt, der Forstlichen Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg und dem Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft ganz herzlich gedankt. Einen ganz herzlichen Dank für die uneingeschränkte Unterstützung bei den Außenaufnahmen und bei fachlichen Fragestellungen möchte ich auch den Mitarbeitern der Niedersächsischen Forstämter Münden und Reinhausen sowie des Niedersächsischen Maschinenstützpunktes Seesen aussprechen, ohne deren Hilfe diesem Werk der wichtige empirische Part fehlen würde.

Dem Bundesministerium für Bildung und Forschung sei für die finanzielle Förderung des BEST-Projektes (Bioenergie-Regionen stärken), in welchem Rahmen diese Dissertation verfasst wurde, gedankt. Der Hartwig-Stiftung gilt für den Druckkostenzuschuss ein ganz herzlicher Dank.

Weiterhin gilt mein Dank den vielen Hilfswissenschaftlern, die mir bei den Außenaufnahmen, bei der Auswertung der Harvester-Videos und bei der Verfassung von schriftlichen Abhandlungen einen nicht unerheblichen Teil der Arbeit abgenommen haben. Hierbei sind Rebekka Kornder, Lena Maack, Lena Peter, Sven Rose, Matthias Alings, Björn Neugebauer und Jan Martin Droll zu nennen. Ebenfalls möchte ich einen ganz persönlichen Dank an Kerstin Reintke richten, welche mir durch ihre Arbeit im Sekretariat bei vielen organisatorischen, personellen und finanziellen Dingen stets helfend zur Seite stand.

Für den täglichen Fachaustausch, aber auch die unzähligen unterhaltsamen Stunden vor und nach Feierabend möchte ich mich bei den mir lieb gewonnenen Kollegen Dr. Claudia Gutsche, Elisabeth Kindler, Marlene Zehfuß, Sebastian Ohrmann, Hilmar von Bodelschwingh, Johannes Gerst, Uwe Mestemacher und Stefan Wilhelm sehr herzlich bedanken. Ein besseres Betriebsklima kann es nicht geben!

Einen weiteren Dank möchte ich meinen Eltern Karin und Hartmut Kleinschmit aussprechen. Durch ihren unbeirrten Glauben an meine eigenen Fähigkeiten und ihre stete „Aufmunterung zum Schreiben“ hatte ich immer den notwendigen starken Rückhalt.

Auch wenn diese Dankesworte nun am Ende dieses Vorwortes stehen, so war und ist mir das unverrückbare Vertrauen und die vorbehaltlose Unterstützung meiner Verlobten Miriam Poetting stets bewusst. Für dieses und die bewiesene Geduld bzw. Rücksicht gerade in der Abschlussphase meiner Dissertation möchte ich mich an dieser Stelle bei ihr von ganzem Herzen bedanken.

Wietzendorf, Juli 2014
Christian Kleinschmit

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	V
Tabellenverzeichnis	XI
Abkürzungsverzeichnis	XIII
1 Einleitung	1
1.1 Einführung und Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung, Forschungshypothesen und Aufbau der Arbeit.....	6
1.3 Theoretischer Bezugsrahmen	7
1.4 Definition von Begrifflichkeiten	9
2 Exkurs: Kronenmorphologie und Holzernte der Buche	11
2.1 Kronenentstehung und Typisierung.....	11
2.2 Besonderheiten der Buchenholzernte	15
3 Methodische Grundlagen zur Ermittlung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität	19
3.1 Betriebswirtschaftliche Modelle	20
3.2 Operation Research.....	21
3.3 Grundlagen der technischen Rohholzproduktion.....	22
3.3.1 Heterogenes Objekt Laubbaum	23
3.3.2 Stückmassengesetz.....	25

3.3.3	Produkt Rohholz	28
3.3.4	Produktionstheoretische Zusammenhänge bei der Aufarbeitung von Baumkronen.....	30
3.4	Kostentheoretische Grundlagen der Rohholzbereitstellung am Einzelbaum 34	
3.5	Grenzkosten in der betrieblichen Kostenrechnung.....	38
3.6	Grundbedingungen für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen	40
4	Prozesskostenanalyse für die hochmechanisierte Buchenkronenaufarbeitung	47
4.1	Einführung und Ziel der Studie	47
4.2	Material und Methodik	48
4.2.1	Personelle und technische Ausstattung.....	48
4.2.2	Untersuchungsflächen und Datenerfassung.....	49
4.2.3	Prozesskostenrechnung	51
4.3	Ergebnisse.....	54
4.3.1	Darstellung des Aufarbeitungsprozesses	54
4.3.2	Verursachungsgerechte Zeitverbrauchszuordnung.....	55
4.3.3	Baumbezogene Auswertungsergebnisse	56
4.3.4	Stückbezogene Auswertungsergebnisse	60
4.4	Schlussfolgerungen.....	66
5	Entscheidungsmodell zur Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität	67
5.1	Modellziel und -konzeption	67
5.2	Randomized Branch Sampling	69
5.2.1	Allometrie.....	69
5.2.2	Methodik des RBS	70
5.2.3	RBS-Datensatz	76
5.3	Ökonomische Bewertung und Optimierung.....	78
5.3.1	Ökonomische Bewertung.....	78
5.3.2	Optimierungsalgorithmus.....	80
5.4	Klassifikation von Kronentypen	82

6	Kalkulationsergebnisse des Entscheidungsmodells	89
6.1	Kalkulationsgrundlagen der Basisvariante	89
6.2	Erfüllung der Optimalitätsbedingung am Einzelbaum	90
6.3	Ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität	93
6.3.1	Ergebnisvalidierung.....	96
6.4	Weitere Kenngrößen ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität	99
6.4.1	Aufarbeitungskosten, -erlöse und Deckungsbeiträge	99
6.4.2	Grenzzopf.....	103
6.5	Variantenstudium.....	105
6.5.1	Ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität	105
6.5.2	Weitere Kenngrößen ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität 111	
7	Wertung und Ausblick	121
7.1	Entscheidungsmodell.....	123
7.2	Analyse der Modellergebnisse.....	127
7.3	Verifizierung der Forschungshypothesen.....	128
8	Zusammenfassung	131
9	Literatur- und Quellenverzeichnis	135
10	Anhang	145

Abbildungsverzeichnis

- Abbildung 1: Zwieselförmiger (links), besenförmiger (mittig) und wipfelschäftiger (rechts) Kronentyp bei Buchen (Eigene Darstellung)..... 14
- Abbildung 2: Vorgabearbeitszeit [min/Fm] nach Tabelle 22 des Erweiterten Sortentarifs (EST) für die Aufarbeitung von Fichten- bzw. Buchen-Industrieholz (IL: Industrieholz lang; W = Kronen-Kranlängen; U = unvermessen und gezählt). 17
- Abbildung 3: Vereinfachtes Verzweigungsmuster einer Baumkrone mit vier Ordnungen, jeweils zwei Astansätzen je Verzweigung und homogenen (links) bzw. inhomogenen (rechts) Astlängen (Eigene Darstellung).24
- Abbildung 4: Vorgabezeit in Minuten je Fm bzw. Stück (entsprechend Formel 1 und Formel 2) in Abhängigkeit von dem Volumen m des Mittelstammes des ausscheidenden Bestandes.....27
- Abbildung 5: Produktionszusammenhänge zwischen Stückvolumen x und dem Mitteldurchmesser d des jeweiligen Stückes.....29
- Abbildung 6: Produktionszusammenhänge zwischen den benötigten n -Stücken für die Bereitstellung eines Festmeters und dem Mitteldurchmesser d des jeweiligen Stückes.30
- Abbildung 7: Verlauf der Produktionsfunktion X bzw. der Grenzertragsfunktion X' für die Aufarbeitung am Baum. Die Produktionsfunktion weist einen neoklassischen Verlauf auf.34
- Abbildung 8: Theoretische, ökonomische Zusammenhänge für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Nutzungsmenge von einem Baum (X) anhand der Kosten-, Erlös- und Gewinnfunktionen (oben) und deren Grenzbetrachtung (unten).37

Abbildung 9: Problematik der Kronenverzweigung und darauf aufbauenden Entscheidungsfindung zur Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität anhand eines ökonomischen Optimierungsalgorithmus.....	44
Abbildung 10: Beispielhafter Ablauf eines Aufarbeitungsprozesses einer schnittrelevanten Verzweigung (SRV) mit einem Harvesteraggregat.....	54
Abbildung 11: Darstellung einer verzweigten (VF) und einer unverzweigten Fixlänge (UVF) nach der Aufarbeitung durch den Harvester.....	55
Abbildung 12: Zeitverbrauch für die Aufarbeitung des gesamten Baumes mit nicht-linearer Ausgleichsfunktion in normaler Form (Zwieseliger Kronentyp: $n=168$; besenartiger Kronentyp: $n=177$; wipfelschäftiger Kronentyp: $n=62$) (ROSE 2013, S. 14).....	57
Abbildung 13: Zeitverbrauch für die Aufarbeitung des gesamten Baumes mit linearer Ausgleichsfunktion in doppelt skaliertes Form (Zwieseliger Kronentyp: $n=168$; besenartiger Kronentyp: $n=177$; wipfelschäftiger Kronentyp: $n=62$) (ROSE 2013, S. 14).....	58
Abbildung 14: Anteil der Aufarbeitungszeit in der Krone getrennt nach Kronentypen.....	60
Abbildung 15: Mittlere Anzahl von allen Fixlängen aufgetragen über 5 cm breite BHD-Klassen und getrennt nach Kronentypen.....	61
Abbildung 16: Mittlere Anzahl von verzweigten Fixlängen aufgetragen über 5 cm breite BHD-Klassen und getrennt nach Kronentypen.....	62
Abbildung 17: Stückbezogener Zeitverbrauch für Fixlängen (ohne AAA Kronenrest) in der hochmechanisierten Ernte in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser bzw. Verzweigungstyp ($n_{\text{unverzweigt}} = 387$, $n_{\text{verzweigt}} = 79$) der Unterstichprobe (ROSE 2013, S. 17).....	63
Abbildung 18: Stückbezogener Zeitverbrauch für Fixlängen (ohne AAA Kronenrest) in der hochmechanisierten Ernte getrennt nach Verzweigungstyp ($n_{\text{unverzweigt}} = 1579$, $n_{\text{verzweigt}} = 344$) der gesamten Stichprobe ($n_{\text{Kronenstücke}} = 1923$) (ROSE 2013, S. 17).....	64
Abbildung 19: Mittlere Anzahl des Prozessschrittes <i>Abwurf Reisig</i> aufgetragen über 5 cm breite BHD-Klassen und getrennt nach Kronentypen (ROSE 2013, S. 19).....	65
Abbildung 20: Modellkonzeption für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität.....	68

- Abbildung 21: (a) Modellbaum mit 40 Segmenten und 27 möglichen Pfaden vom Baumstumpf bis zu den 27 Terminalknospen; (b) ein möglicher Pfad bestehend aus 4 Knoten und 4 Segmenten; (c & d) RBS-Pfade können an allen Knoten beginnen bzw. enden und nur Teilbereiche des Baumes schätzen (mit Punkten eingegrenzter Bereich am Pfad) (GREGOIRE & VALENTINE, 2008, S. 406). 72
- Abbildung 22: (a) Der untere Knoten des ersten Segmentes ist definiert als der erste Knoten, (b) am zweiten Knoten wird ein Ast mit der Auswahlwahrscheinlichkeit q_2 ausgewählt. (c) Am dritten Knoten wird wiederum einer der Äste mit der Auswahlwahrscheinlichkeit q_3 gezogen, wodurch das dritte Segment am Pfad fixiert wird. (e) Bei dem vierten Knoten wird entsprechend verfahren (f) bis die Terminalknospe erreicht ist (GREGOIRE & VALENTINE, 2008, S. 407). 73
- Abbildung 23: Mehrstufige Schätzung des Baumholzvolumens aus (a) einem Pfad mit 4 Segmenten. (b) Das Holzvolumen des vierten Segments dividiert durch seine Auswahlwahrscheinlichkeit q_4 ergibt das (c) Holzvolumen der vierten Ordnung. Dieses (d) Holzvolumen addiert um das 3. Segmentholzvolumen und dividiert durch die Auswahlwahrscheinlichkeit q_3 ergibt das (e) Holzvolumen der dritten Ordnung. Dies wird (f) bis zum Ende des Pfades zu fortgesetzt (GREGOIRE & VALENTINE, 2008, S. 413). 75
- Abbildung 24: Darstellung der rekursiven Rechenweise des Optimierungsalgorithmus.....81
- Abbildung 25: 10 %-Perzentile der relativen kumulierten Astdurchmesser nach Kronentypen geclustert inkl. polynomischer Regression für jeden Kronentyp (HUSMANN, 2013, S. 65).85
- Abbildung 26: Verzweigungsanzahl getrennt nach Kronentypen aufgetragen über BHD.....86
- Abbildung 27: Anzahl der Verzweigungen mit mindestens zwei Ästen größer 7 cm getrennt nach Kronentypen aufgetragen über BHD.87
- Abbildung 28: Verlauf der Grenzkosten [EUR/Fm] (oben) und des holzerntekostenfreien Erlöses [EUR/Pfad] (unten) über den Zopfdurchmessern der drei RBS-Pfade für die Bäume 335 und 94 nach hochmechanisierter Aufarbeitung. Hervorhebung des ökonomisch optimalen Grenzzopfes (vertikale Linie) bei einem Holzpreis von 50 EUR/Fm (horizontale Linie).....91
- Abbildung 29: Ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität (AI) der Buchenkronen für die hochmechanisierte Aufarbeitung (HM) in

Abhängigkeit von dem BHD und getrennt nach den Kronentypen (KRT).	94
Abbildung 30: Ökonomisch optimal nutzbares Kronenholzvolumen (KHV) in Abhängigkeit vom BHD getrennt nach den Kronentypen (KRT) und für die hochmechanisierte Aufarbeitung (zugehörig Formel 33 bis Formel 35).....	95
Abbildung 31: Vergleich der nutzbaren Einzelbaumholzvolumen (BHV) der empirischen Daten (n=101) und der Modellergebnisse unter ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität (n=163).	97
Abbildung 32: Vergleich der Aufarbeitungsintensitäten der empirischen Daten (n=101) und der Modellergebnisse unter ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität (n=163).	98
Abbildung 33: Darstellung der Aufarbeitungskosten je Buchenkrone (bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) getrennt nach Kronentypen über dem BHD der Untersuchungsobjekte (Funktionen s. Anhang 8).....	100
Abbildung 34: Darstellung der durchschnittlichen Aufarbeitungskosten je Fm (bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) getrennt nach Kronentypen über dem BHD der Untersuchungsobjekte.	101
Abbildung 35: Darstellung des Erlöses je Buchenkrone [EUR] (bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) für die hochmechanisierte Holzernte über dem BHD [cm] und getrennt nach Kronentypen (Funktionen s. Anhang 10).....	102
Abbildung 36: Darstellung des holzerntekostenfreien Erlös in der Buchenkrone (bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) für die hochmechanisierte Holzernte in Abhängigkeit vom BHD [cm] und getrennt nach Kronentypen (Funktionen s. Anhang 12).	103
Abbildung 37: Grenzzopf (GZ) unter ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität in Abhängigkeit vom BHD der 163 RBS- Einzelbäume für die hochmechanisierte Kronenaufarbeitung.....	104
Abbildung 38: Ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensitäten von Buchenkronen unterschiedlicher Erlös-Varianten in Abhängigkeit von den Aufarbeitungskosten. Die Berechnung basiert auf dem Kronentyp 2 (Regressionsfunktionen s. Anhang 14).....	107
Abbildung 39: Ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensitäten von Buchenkronen unterschiedlicher Kosten-Varianten in Abhängigkeit von	

- den Aufarbeitungskosten. Die Berechnung basiert auf dem Kronentyp 2 (Regressionsfunktionen s. Anhang 15).....107
- Abbildung 40: Limitierender Einfluss von Kosten bzw. Erlösen auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen ausgehend von der Basisvariante (Erlös 50 EUR/Fm, Kosten 175 EUR/MAS) unter Veränderung eines ökonomischen Parameters (*ceteris paribus*). Der dunkelgraue Bereich bleibt ungenutzt, der hellgraue Bereich ist bei entsprechender Kostenminderung bzw. Erlöserhöhung ökonomisch optimal zu nutzen. Die Berechnung basiert auf dem Kronentyp 2 bzw. der hochmechanisierten Aufarbeitung.....109
- Abbildung 41: Prozentuale Änderung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität über prozentualer Änderung der Erlöse bzw. der Kosten bei der hochmechanisierten Buchenkronenaufarbeitung. Die Referenz stellt das Verhältnis von den beiden summierten Größen des ökonomisch optimal nutzbaren Kronenholzvolumens und des gesamten Kronenholzvolumens aller 163 RBS-Einzelbäume bei dem Kosten-Erlös-Verhältnis der Referenzvariante (Kosten 175 EUR/MAS; Erlös 50 EUR/Fm; Kronentyp 2) dar.110
- Abbildung 42: Aufzuarbeitendes Kronenholzvolumen bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität bei unterschiedlichen Kostenvarianten (+/- 30 %) im Zuge der hochmechanisierten Kronenaufarbeitung. Die Funktionen beziehen sich auf den Kronentyp 2.112
- Abbildung 43: Aufzuarbeitendes Kronenholzvolumen bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität bei unterschiedlichen Erlösvarianten (+/- 30 %) im Zuge der hochmechanisierten Kronenaufarbeitung. Die Funktionen beziehen sich auf den Kronentyp 2.113
- Abbildung 44: Prozentuale Änderung des nutzbaren Kronenholzvolumens bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität über prozentualer Änderung der Erlöse bzw. der Holzerntekosten bei der hochmechanisierten Buchenkronenaufarbeitung. Die Referenz stellt das summierte, nutzbare Kronenholzvolumen aller 163 RBS-Einzelbäume bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität, berechnet anhand der Basisvariante (Kosten 175 EUR/MAS; Erlös 50 EUR/Fm; Kronentyp 2), dar.....114
- Abbildung 45: Erntekostenfreier Holzerlös je Krone bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität bei unterschiedlichen Kostenvarianten.....115
- Abbildung 46: Erntekostenfreier Holzerlös je Krone bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität bei unterschiedlichen Erlösvarianten im Zuge der hochmechanisierten Buchenkronenaufarbeitung.115

- Abbildung 47: Prozentuale Änderung des erntekostenfreien Holzerlöses (EKFE) bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität über prozentualer Änderung der Erlöse bzw. der Holzerntekosten bei der hochmechanisierten Buchenkronenaufarbeitung. Die Referenz stellt das summierte, nutzbare Kronenholzvolumen aller 163 RBS-Einzelbäume bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität, berechnet anhand der Basisvariante (Kosten 175 EUR/MAS; Erlös 50 EUR/Fm; Kronentyp 2), dar.116
- Abbildung 48: Erntekostenfreier Holzerlös (EKFE) je Krone bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität in Abhängigkeit vom Kronentyp im Zuge der hochmechanisierten Kronenaufarbeitung.117
- Abbildung 49: Differenz der erntekostenfreien Holzerlöse je Krone zwischen dem Kronentyp 2 (Null-Linie) und den übrigen Kronentypen bei verschiedenen Erlösvarianten (40 EUR, 50 EUR, 60 EUR) und fixen Maschinenarbeitskosten von 175 EUR/MAS.....118

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1. Übersicht über die Anforderungen einer Grenzkostenanalyse bei der Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Einzelbäumen.....	41
Tabelle 2: Beschreibende Statistik der Untersuchungsobjekte (n=407) in den Versuchsbeständen Abt. 3221a2 und Abt. 3240b1 der Revierförsterei Mollenfelde im Niedersächsischen Forstamt Münden.	50
Tabelle 3: Beschreibende Statistik der Unterstichprobe (n=101) in den Versuchsbeständen Abt. 3221a2 und Abt. 3240b1 der Revierförsterei Mollenfelde im Niedersächsischen Forstamt Münden.	51
Tabelle 4: Beschreibende Statistik der ausgehaltenen Kronen- (n=466) und Stammsortimente (n=278) der Unterstichprobe (n=101).....	51
Tabelle 5: Zuordnung der Prozessschritte und Arbeitsablaufabschnitte auf die beiden Typen von Fixlängen.....	56
Tabelle 6: Beschreibende Statistik der Aufarbeitungszeit der 1923 untersuchten Fixlängen getrennt nach Verzweigungstyp.	64
Tabelle 7: Beschreibende Statistik des Zeitverbrauchs für den Prozessschritt <i>Abwurf Reisig</i> über alle Kronentypen.	65
Tabelle 8: Zeitverbrauch für unverzweigte und verzweigte Fixlängen inkl. Zeiten für das Abwerfen des Reisigs.....	66
Tabelle 9: Erfasste Parameter an Laubbäumen (RUMPF et al. 2011, S. 34; erweitert um BÖSCH 2010).....	77

Tabelle 10: Übersicht über die mit dem RBS-Verfahren aufgenommenen Buchen getrennt nach Datenbankherkunft mit arithmetischem Mittelwert und Bereich des Durchmesser, der Höhe und des Alters (HUSMANN, S. 12).	78
Tabelle 11: Ökonomische Bewertung der hochmechanisierten Holzernte.....	79
Tabelle 12: Ausstattung der BHD-Klassen [cm] mit denen nach dem Verfahren von HUSMANN (2013, S. 59ff) klassifizierten Buchenkronentypen.....	83
Tabelle 13: Kalkulationsgrundlagen der Basisvariante (ohne Umsatzsteuer).....	90
Tabelle 14: Anzahl der RBS-Untersuchungsobjekte [n] ohne Kronennutzung in Abhängigkeit zur BHD-Klasse [10 cm].....	90
Tabelle 15: Beschreibende Statistik des Grenzzopfes unter ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität der RBS-Einzelbäume nach hochmechanisierter Kronenaufarbeitung.	104
Tabelle 16: Beispielrechnung für die ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensitäten bzw. holzerntekostenfreien Erlöse (EKFE) aus Buchenkronen einer Hiebsmaßnahme mit 50 ausscheidenden Bäumen von einem BHD von 35 cm unter unterschiedlichen Kosten-, Erlös- und Kronentypenvarianten.	119

Abkürzungsverzeichnis

AAA	Arbeitsablaufabschnitt
AA	Produktionsfaktor Ausführende Arbeit
AI	Ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität
AS	Aufarbeitungsschritt/e
AZ	Produktionsfaktor Arbeitszeit
BB Göttingen	Betriebswirtschaftlichen Büro Göttingen
BHD	Brusthöhendurchmesser auf 1,3 m Höhe
BM	Produktionsfaktor Betriebsmittel
bzw.	beziehungsweise
DB	Deckungsbeitrag
DF	Freiheitsgrade; engl. „Degrees of freedom“
EKFE	Erntekostenfreier Holzerlös
EST	Erweiterter Sortentarif
EUR	Währung Euro
FZV	Fortschrittszeitverfahren
GE	Geldeinheiten, keine definierte Währung
GZ	Ökonomisch optimaler Grenzzopf
HM	Hochmechanisierte Kronenaufarbeitung
i.d.R.	in der Regel
KHV	Ökonomisch optimal nutzbares Kronenholzvolumen
KRT	Kronentyp
lfm	laufender Meter
MAS	Maschinenarbeitsstunde
Max	Maximum
Min	Minimum
m.R.	mit Rinde

o.R.	ohne Rinde
OR	Operation Research
PF	Produktionsfaktor/en
RAZ	Reine Arbeitszeit
RBS	Randomized Branch Sampling
Sd	Standardabweichung; engl. „standard deviation“
Sek	Sekunde
sic!	lat. „so“, „wirklich so“
SRV	Schnittrelevante Verzweigung
UVF	Unverzweigte Fixlänge
u.v.m.	und vieles mehr
VF	Verzweigte Fixlänge
WS	Produktionsfaktor Werkstoffe

1 Einleitung

„Die Sorgfalt der Arbeit, z.B. beim Auflesen der Kartoffeln, darf nicht weiter gehen, als bis die zuletzt darauf gewandte Arbeit noch durch das Plus des Ertrags vergütet wird.“

(THÜNEN 1910, S. 411 (* 1783, † 1850))

1.1 Einführung und Problemstellung

„Wirtschaften ist der Inbegriff aller planvollen menschlichen Tätigkeiten, die unter Beachtung des ökonomischen Prinzips (Rationalitätsprinzip) mit dem Zweck erfolgen, die – an den Bedürfnissen der Menschen gemessen – bestehende Knappheit der Güter zu verringern“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 2). Die vorhandenen, knappen Mittel sind folglich so einzusetzen, dass ein höchstmögliches Maß der Bedürfnisbefriedigung erreicht wird. Dieses Prinzip wird als allgemeines Vernunftsprinzip oder Rationalitätsprinzip bzw. im ökonomischen Kontext als Wirtschaftlichkeitsprinzip oder *ökonomisches Prinzip* bezeichnet. Es kann als Maximalprinzip, bei dem „unter Einsatz eines gegebenen Aufwandes ein größtmöglicher Güterertrag zu erzielen ist“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 1), oder als Minimalprinzip, bei dem „ein gegebener Güterertrag mit geringstmöglichem Einsatz von Produktionsfaktoren zu erwirtschaften ist“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 1) interpretiert werden.

Die „Realisierung dieses Ziels optimaler Bedürfnisbefriedigung setzt einen Entscheidungsprozess über die Herstellung von Gütern (Produktion) und den Verbrauch von Gütern (Konsumtion)“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 1) durch han-

delnde Personen¹ voraus, welche beispielsweise Betrieben zugeordnet werden können. Nach HEINEN (1983, S. 32) ist der Betrieb als eine „organisierte Gesamtheit von Produktionsfaktoren zu verstehen, welche die mit der Erzeugung und Weitergabe von Sachgütern bzw. mit der Bereitstellung von Dienstleistungen verbundenen Entscheidungs- und Ausführungsaufgaben nach dem Prinzip der Wirtschaftlichkeit erfüllt“. Ein Betrieb lässt sich nach HEINEN (1983, S. 34) vertikal nach Betriebsebenen gliedern, in welchen wirtschaftliche Entscheidungen mit unterschiedlichen Zielvorstellungen getroffen werden. „Die Entscheidungen in den oberen Instanzen ... werden primär unter [dem] erwerbswirtschaftlichen [Prinzip], diejenigen in den mittleren und unteren Instanzen entsprechend dem ökonomischen Prinzip getroffen“ (HEINEN 1983, S. 34). Für die Entscheidungen der Leitungsebene eines Betriebes (= strategische Ebene) stellt demnach „das erwerbswirtschaftliche Prinzip in Form des Gewinn- oder Rentabilitätsstrebens ... ein operationales Ziel“ (HEINEN 1983, S. 34) dar. Die „Erträge und Kosten bilden also die Erwartungsparameter der ... [Betriebsführung]. Aus dem Vergleich der Erwartungsparameter versucht die Führungsspitze konkrete Vorstellungen über die Gewinnbeiträge der von ihr zu beurteilenden Handlungsalternativen abzuleiten“ (HEINEN, 1983, S. 34). Für die mittleren und unteren Instanzen (= operative Betriebsebene) muss die Betriebsleitung hingegen die Handlungsziele in Bezug auf die Gewinnüberlegung konkretisieren, da der Gewinn im Gegensatz zu den Kosten für diese operativen Betriebsebenen eine abstrakte, nicht-operationale Zielgröße darstellt. „Für die Handlungen der mittleren und unteren Instanzen stellt hier das ökonomische Prinzip in Form der Kostenwirtschaftlichkeit ein geeignetes, operationales Unterziel dar, denn jede Steigerung der Wirtschaftlichkeit führt ceteris paribus zu einer Gewinnsteigerung. Aus der Sicht der ... [Betriebsleitung] bilden somit die Kosten als Ausdruck der Wirtschaftlichkeit die zu delegierenden Ziel- bzw. Steuerungsgrößen für die Entscheidungs- und Ausführungsaufgaben der unteren Instanzen einer Betriebswirtschaft“ (HEINEN 1983, S. 35).

Folglich muss betriebswirtschaftliches Kostendenken in der operativen Betriebsebene besonders ausgeprägt sein. Im Forstbetrieb ist der Bereich der Holzernste, in dessen Bereich die Produktbereitstellung in Form von Rohholz fällt, vorwiegend der operativen Betriebsebene zuzuordnen. Die entscheidenden Akteure sind auf dieser Ebene die Forstwirte bzw. Maschinenführer, welche die Aufarbeitung der Bäume selbst vornehmen und deren betriebswirtschaftliches Kostendenken die Grundlage für effektives bzw. kosteneffizientes Handeln darstellt.

¹ WÖHE & DÖRING (2000, S. 1) setzen in ihrem Standardwerk der Betriebswirtschaftslehre bzw. zur allgemeinen Darstellung der Wirtschaft und des wirtschaftlichen Prinzips den Menschen in den Mittelpunkt der Handlung. Obwohl klassischer Weise die Erstellung und der Verbrauch von Gütern der volkswirtschaftlichen Betrachtungsweise zuzuordnen ist, werden in dieser Arbeit die Termini nach WÖHE & DÖRING (2000, S. 1) verwendet.

Hierfür benötigen die Entscheider jedoch entsprechende ökonomische Informationen hinsichtlich der Kostenabhängigkeiten der Aufarbeitung, welche ihnen helfen, die – hinsichtlich der Zielvorstellung eines gewinnmaximierenden Betriebes – ökonomisch vorteilhafteste Entscheidung zu treffen. Diese findet sich dort, wo die Grenzkosten der zusätzlichen Einheit den zugehörigen Grenzerlösen entsprechen (WÖHE & DÖRING 2000, S. 392) und genau dieses Wissen um die Grenzkosten benötigt ein Entscheider (HOSTETTLER 2003, S. 47). Nach MÖHRING (1997, S. 68) ist „die Kenntnis der betrieblichen Kostenabhängigkeiten eine zwingende Voraussetzung für kostenbewußtes[!] Handeln bzw. Kostenvermeidung“. Das wichtigste Ziel des Entscheidungsträgers muss es daher sein, die betriebswirtschaftlichen Kostenzusammenhänge zu verstehen, um die Aufarbeitung des Einzelbaumes bis zur ökonomisch optimalen Aufarbeitungsgrenze bzw. zur ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität durchführen zu können, da hierdurch der maximale Deckungsbeitrag aus der Aufarbeitung des Einzelbaumes erreicht wird.

Die Erreichung einer ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität ist dabei nicht nur für den Forstbetrieb (vgl. MÖHRING et al. 2010, S. 85ff), sondern auch nach ZIEGELER (2008, S. 104) für den selbstwerbenden Holzkäufer das Ziel seines Handelns und bekommt insbesondere unter volatilen Marktverhältnissen eine besondere Bedeutung. So stieg allein der Verkaufspreis pro Kubikmeter der Holzartengruppe Buche vom Jahr 2003 bis 2011 um rd. 35 % an (ERMISCH et al. 2013, S. 8), was vorwiegend auf den Energiepreisanstieg zurückzuführen ist. Deutschlandweit stieg die Laubderbholzverwendung in der vergangenen Dekade um beträchtliche 8 Mio. m³ an (MANTAU 2012, S. 19). Die gestiegene Nachfrage schlägt sich in höheren Verkaufspreisen nieder, wodurch insbesondere Laubholz dominierte Forstbetriebe profitieren (MÖHRING et al. 2010, S. 85). Bei den Laubholzbetrieben im BB-Betriebsvergleich wurden nach TROTHA et al. (2013, S. 18) im Jahr 2012 56 % des Einschlags als Industrie- und Brennholz ausgewiesen, welcher seitens des Käufers theoretisch energetisch genutzt werden könnte. Nach WEIMAR & SEINTSCH (2012, S. 57) wiederum wurden im Jahr 2011 rd. 80 % des Laubholzes energetisch genutzt, wovon die Baumartengruppe Buche den größten Anteil einnimmt. Den Auswertungen von DIETER (2013, S. 43) zufolge beläuft sich allein das mit den Herstellungspreisen bewertete Brennholzaufkommen (Nadel- und Laubholz) im Jahr 2011 auf rd. 470 Mio. EUR. Auf Grund der gestiegenen Nachfrage für geringwertige Sortimente in bis dato nicht bekannte Höhen erscheinen große Teile des bisher ungenutzten Rohholzpotentials - insbesondere im Nicht-Derbholzbereich - nutzbar. Grundsätzlich sei an dieser Stelle daraufhin gewiesen, dass der Verkaufspreis eine exogene Größe ist und von dem Entscheidern praktisch nicht gesteuert werden kann. Folglich muss die Steuerung der Aufarbeitungsintensität vorwiegend über die Kosten erfolgen und entsprechend wichtig ist das betriebswirtschaftliche Kostendenken bzw. die Kostensensibilität des Entscheidenden.

Ergänzend zu dieser Problematik führt MÖHRING (1997, S. 68) an, dass die Bestimmung einer ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität auf Grund der „Berechnung des Kostenverlaufes [bei der Aufarbeitung eines Baumes] keineswegs besonders einfach [ist]. Es gilt, die äußere Form der zu bearbeitenden Bäume ... und die sorten- und stärkeabhängigen Holzernte- und Rückekosten zu berücksichtigen“. Die Lösung dieses komplexen Problems – und zwar die verursachungsgerechte Zurechnung der Kosten und Erlöse auf den Kostenträger entsprechend dem Grenzkostenprinzip – erfolgt in der forstlichen Praxis „intuitiv“ durch den Entscheider selbst. Aber auch in den heutigen forstlichen Modellen zur Schätzung von Nutzungsvolumen werden die wichtigen Zusammenhänge nur unzureichend berücksichtigt. So wird i.d.R. die Schätzung der Aufarbeitungsintensität am Einzelbaum „unökonomisch“ als rein technisches Problem behandelt. Auch erfolgt die Schätzung des nutzbaren Holzvolumens üblicherweise anhand von Schaftformfunktionen oder Ertragstafeln, womit allein das potentielle Nutzungsholzvolumen auf das Derbholz reduziert wird und somit eine höhere Nutzungsintensität des Baumes ausgeschlossen ist. Ist das tatsächlich nutzbare Holzvolumen durch die Verwendung der eben angeführten Hilfsmittel bekannt, so wird häufig mit Bestandessortentafeln (vgl. SCHÖPFER & DAUBER 1989) eine Sortimentierung vorgenommen, ohne dass diese – da sie rein auf Hiebsergebnissen basieren und somit einer Vielzahl von Einflüssen wie Aushaltungsvorgaben, technische Ausstattung, Bestandesverhältnissen usw. unterliegen – nicht nur ökonomisch begründet sind. Eine ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität von Buchen findet sich in der dem Autor bekannten Literatur nicht, lediglich eine ökonomisch determinierte Zopfgrenze findet sich sehr vereinzelt bei wissenschaftlichen Arbeiten wie bspw. BONT (2005, S. 111f). Einige Schätzmodelle hingegen können zumindest manuell vom Nutzer einzugebende Aufarbeitungsgrenzen verarbeiten und entsprechend die nutzbaren Holzvolumen anpassen. Allen im Folgenden kurz vorgestellten Schätzmodellen ist es jedoch gemein, dass die zugehörigen betriebswirtschaftlichen Kalkulationen auf Durchschnittskostensätzen aufbauen und somit die Kostenentstehung im Aufarbeitungsprozess bzw. deren verursachungsgerechte Zurechnung auf den Kostenträger nur unzureichend berücksichtigt wird.

Ein Beispiel für die Nutzung von Schaftformfunktionen mit gleichzeitiger manueller Eingabe von Aufarbeitungsgrenzen ist das Modell „Waldentwicklung- und Holzaufkommensmodellierung“ (kurz: WEHAM), mit dessen Hilfe auf Basis der Daten der Bundeswaldinventur (BWI) u.a. zukünftige Rohholzpotentiale abgeschätzt werden können. Es basiert auf drei Komponenten, dem Zuwachs-, dem Nutzungs- und dem Sortimentierungsmodell (FVA FREIBURG 2004, S. 2). Während im Zuwachsmodell auf Basis der BWI-Daten die Volumenzuwächse generiert und im Nutzungsmodell über Grundflächenleitkurven und den Parametern Zielalter und –durchmesser die Nutzung modelliert werden, wird im Sortimentierungsmodell der geschätzte Holzanfall auf der Basis von Einheitsschaftformfunk-

tionen (KUBLIN 2003, S. 183f) und dimensionsorientiert in seine Sortimente zerlegt². Eine Optimierungsroutine der Aushaltung bzw. zur Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsgrenzen ist nicht Teil des Modells, sodass die Zopfgrößen manuell in der jeweiligen Sortiervariante hinterlegt werden müssen (FVA FREIBURG 2004, S. 19f).

Einen ökonomisch optimalen Grenzzopf zwischen stofflicher (Stammholz und Industrieholz) und energetischer Nutzung (Hackgut) für die Baumarten Fichte und Buche berechnet BONT (2005, S. 111f) anhand von Methoden der dynamischen Programmierung. Über einen Optimierungsalgorithmus wird auf der Grundlage von Schaftformfunktionen derjenige Punkt am Schaft bzw. der Baumhöhe gesucht, an welchem der Gewinn aus dem Energieholzverkauf größer als aus dem Stammholzverkauf³ ist. Das Energieholz ist dabei dasjenige Holzvolumen, welches vom Stammholz-Grenzzopf bis zur Baumspitze bestehend aus Schaftholz, Astderbholz und Astreisig anfällt.

Eine ähnliche Definition der Zopfgrößen zwischen stofflicher und energetischer Nutzung nutzt HEPERLE (2010, S. 24) bei der Entwicklung der „Erweiterten Freiburger Methode“. Auf der Basis des Programms Holzernte 7.1 mit den dort hinterlegten Schaftformfunktionen und ohne die Verwendung von Optimierungsalgorithmen wird eine Abschätzung der Energieholzverfügbarkeit vorgenommen. Dabei berücksichtigt das insgesamt sehr komplexe Modell diverse ökologische, technische und wirtschaftliche Faktoren, welche über verschiedene Stellenschrauben das vorhandene Energieholzpotential reduzieren. Über zwei Aushaltungsvarianten („Stammholz-PLUS“ und „Herkömmliche Aushaltung“) soll dabei der Einfluss der Sortenbildung auf das Waldenergieholzpotential gezeigt werden. Der Grenzzopf für die stoffliche Nutzung wird dabei – wie im Programm Holzernte 7.1 üblich – manuell über die Aushaltungsvorgaben gesetzt.

Insgesamt ist festzuhalten, dass das „Wissen um die Bedeutung der Grenzkosten als rationale Basis für wirtschaftliche Entscheidungen ... in der forstlichen Praxis wahrlich nicht sehr weit verbreitet“ (MÖHRING 1997, S. 68) ist. Viel verbreiteter sind Diskussionen bezüglich der Nutzungsintensität unter dem Gesichtspunkt der Nährstoffnachhaltigkeit (RADEMACHER 2005, S. 288; vgl. FVA FREIBURG 2011; FVA FREIBURG 2013) oder der Flächennutzungsintensität (vgl. DUMMEL 1975). Arbeiten über die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität von Bäumen oder gar nur von Baumkronen finden sich hingegen in der Literatur bisher nicht.

² Das Sortimentierungsmodell greift auf die Datenbanken und Rechenalgorithmen des Programms Holzernte der FVA Freiburg zu.

³ BONT (2005, S. 76) definiert Stammholz (im weiteren Sinne) als ein aus den Sortimenten Stammholz und Industrieholz bestehendes Sortiment.

1.2 Zielsetzung, Forschungshypothesen und Aufbau der Arbeit

Dieses Dissertationsvorhaben zielt auf die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen ab. Wie in Kapitel 1.1 dargestellt, existiert in diesem Bereich der forstlichen Wissenschaft nicht unerheblicher Forschungsbedarf.

Hierbei sollen insbesondere folgende Forschungshypothesen beantwortet werden:

1. Die Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen ist ökonomisch determiniert.
2. Die Kronenmorphologie von Buchen hat einen signifikanten Einfluss auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität.
3. Die Größe des ökonomisch optimalen Grenzzopfes ist unabhängig vom BHD des Baumes.
4. Die Aufarbeitungskosten haben einen stärkeren Einfluss auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität als die Erlöse.
5. Steigende Erlöse für Industrieholz bzw. Brennholz führen zu einer erhöhten ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Kronen und einer Nutzung im Nicht-Derbholzbereich.

Zur Beantwortung der Forschungshypothesen ist diese Arbeit in insgesamt acht Kapitel gegliedert. Kapitel 0 (im Anschluss an die aktuellen Ausführungen) setzt den theoretischen ökonomischen Bezugsrahmen der Thematik und definiert die in der gesamten Arbeit häufig verwendeten Begrifflichkeiten. Im Anschluss an das Einleitungskapitel schließt sich ein Exkurs zu der Baumart Buche (Kapitel 2) an, in welcher insbesondere auf deren Kronenform und auf Besonderheiten von deren Ernte eingegangen wird.

Mit den Grundzügen der Bewertung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität und deren Grundlagen befasst sich das Kapitel 3. Hier werden neben den produktionstheoretischen insbesondere auch die kostentheoretischen Grundlagen für die Bewertung und die Durchführung einer Grenzkostenanalyse vorgestellt. Das Kapitel endet mit dem für das Verstehen der weiteren Dissertationsschrift wichtigen Unterkapitel 3.6, in welchem als eine Synopse aus dem gesamten Kapitel 3 auf die Grundbedingungen für eine möglichst realitätsnahe Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen eingegangen wird.

Aus den Ausführungen in dem Unterkapitel 3.6 wird deutlich, dass die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität nur anhand von sehr detaillierten Informationen über das naturale Produktionsmodell, die Erlöse und die Kosten bzw. deren Entstehung (Aufarbeitungsprozesse) funktionieren kann. Da in der Literatur keine entsprechend brauchbaren Informationen über die Aufarbeitungsprozesse und die Kostenentstehung insbesondere für die hochme-

chanisierte Holzernte vorliegen, war die eigenständige Durchführung einer video-basierten Prozesskostenanalyse notwendig. Diese Prozesskostenanalyse wird im Kapitel 4 mitsamt den zugehörigen Hauptergebnissen vorgestellt. Die aus der Prozesskostenanalyse gewonnenen Erkenntnisse fließen unmittelbar über die ökonomische Bewertung der hochmechanisierten Aufarbeitung (Kapitel 5.3.1) in das ökonomische Entscheidungsmodell und in die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität ein (Kapitel 5).

Kapitel 5 behandelt das Entscheidungsmodell zur Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität selbst. In diesem Kapitel fließen sämtliche Erkenntnisse um die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität aus den Kapiteln zwei bis vier zusammen und finden dort in dem Modell Anwendung. Zudem wird mit dem Randomized Branch Sampling (RBS) ein Stichprobenverfahren vorgestellt, auf dessen Methodik bzw. Datensatz (163 Einzelbäume) das Produktionsmodell, die Kronenklassifikation, die ökonomische Bewertung und der Optimierungsalgorithmus für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität aufbauen.

Die Kalkulationsergebnisse aus dem Entscheidungsmodell werden im Kapitel 6 vorgestellt. Bis einschließlich des Unterkapitels 6.4 werden eine Vielzahl von Ergebnissen samt deren Validierung auf Basis einer einzigen Kosten-Erlös-Variante (Basisvariante) vorgestellt. Diese gibt eine aktuell vorherrschende Kosten-Erlös-Situation in Süd-Niedersachsen wieder. Im letzten Unterkapitel des Kapitels 6 werden im Rahmen eines Variantenstudiums die Kosten bzw. Erlöse variiert, sodass deren Einfluss auf das Modell (Modellsensibilität) bzw. auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität aufgezeigt werden kann.

Im anschließenden Kapitel 7 werden zuerst das erstellte Entscheidungsmodell und die erzielten Ergebnisse hinterfragt und gewertet. Anschließend wird ein Versuch unternommen, die Forschungshypothesen anhand der Modellergebnisse zu verifizieren (Kapitel 7.3).

Mit der Zusammenfassung (Kapitel 8) der wichtigsten Kernergebnisse der vorliegenden Studie schließt diese Dissertationsschrift ab.

1.3 Theoretischer Bezugsrahmen

Die vorliegende Untersuchung bearbeitet mit dem Grenzkostenansatz ein klassisches Thema der Volks- und Betriebswirtschaftslehre, welches seinen Beginn bereits in dem Theoriegebäude der *Neoklassik* (ab 1850) fand (SÖLLNER 2013, S. 41ff). Diese ökonomische Theorie, welche damals auch als „marginalistische Revolution“ oder „Marginalismus“ benannt wurde und der klassischen Nationalökonomie um Adam Smith folgte, prägt auch noch heute die herrschende Lehre. Die neoklassische Theorie fand ihren Ursprung zuallererst in der Mikroökonomie. Im Zentrum der Überlegungen standen dabei das Verhalten einzelner Wirtschaftssub-

jekte und die Verteilung vorhandener Ressourcen auf die verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten. Sowohl die Schwierigkeiten der Wert- und Preisbestimmung als auch die Entscheidungen der Haushalte im Bezug zu Konsum und Produktionsfaktorangebot bzw. der Unternehmen hinsichtlich Produktionsstruktur und –umfang wurden hierbei untersucht.

Die theoretische Grundstruktur der Neoklassik zeichnet sich durch drei Hauptelemente aus, wovon das *Prinzip der Optimierung unter Nebenbedingungen* das Fundament darstellt (SÖLLNER 2013, S. 43f). Hierbei wird anhand einer Zielfunktion eine Zielgröße (z. B. Nutzen, Gewinn oder Kosten) unter Beachtung von Nebenbedingungen (z. B. Budget, Produktionsmenge) optimiert, d. h. je nach Fragestellung mini- oder maximiert. Die Optimierung erfolgt dabei anhand einer Grenzbetrachtung, bei der die Veränderung der Zielgröße bei infinitesimal kleiner Änderung der Inputparameter analysiert wird (*Marginalanalyse*). Zudem geht die Neoklassik vom nutzenmaximierenden Verhalten des Menschen aus (*Homo oeconomicus*) und definiert diesen als rational. Der rational denkende Entscheider wird daher unter Beachtung der Restriktionen immer versuchen, seinen Nutzen zu maximieren, alles andere wäre aus neoklassischer Sichtweise irrational. Dazu stehen dem Entscheider prinzipiell *vollkommene Informationen* über die Entscheidung (Entscheidung unter Sicherheit) zur Verfügung. Ein weiterer Punkt ist das Prinzip des *methodischen Individualismus*. Dieses bereits in der klassischen Nationalökonomie aufgeführte Prinzip besagt, dass alle Entscheidungen durch Individuen durchgeführt werden und somit alle ökonomischen Phänomene durch die individuellen Handlungen erklärt werden müssen.

Neben Antoine Augustin Cournot (1801-1877) und Hermann Heinrich Gossen (1810-1858) zählt Johann Heinrich von Thünen (1783-1850) zu den Gründungsvätern der neoklassischen Denkweise. Während Gossen mit dem Sättigungsgesetz (erstes Gossensches Gesetz) und dem Grenznutzensausgleichsgesetz (zweites Gossensches Gesetz) die Grundlagen für die Konsumtheorie legte, leistete Thünen Pionierarbeit auf dem Gebiet der Produktions- und Verteilungstheorie mit der Grenzproduktivitätstheorie der Faktorentlohnung (vgl. Einleitungszitat; THÜNEN 1910, S. 411). Diese Arbeiten gehören „nach heutiger Wissenschaftsgrenzung [zu den] betriebswirtschaftliche[n] Untersuchungen“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 65).

Neben der Theorie der Neoklassik ist die vorliegende Arbeit natürlich auch der Entscheidungstheorie zuzuordnen. In der Entscheidungstheorie steht das menschliche Verhalten, welches „bestimmte Ziele unter der Annahme unterschiedlicher realer Handlungsalternativen optimal realisieren will“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 77), in Entscheidungssituationen im Vordergrund. Entscheidungstheoretische Analysen können dabei „auf die Gewinnung vorschreibender (normativer, präskriptiver) Aussagen oder auf die Gewinnung beschreibender (desk-

riptiver) Aussagen ausgerichtet sein“ (BAMBERG & COENENBERG 2000, S. 1). Entsprechend wird zwischen einer *normativen Entscheidungstheorie*⁴, welche sich „mit dem Auffinden rationaler (optimaler) Entscheidungen befasst“, und der *empirisch-realistischen Entscheidungstheorie*⁴, welche sich „mit dem tatsächlichen Entscheidungsverhalten von Menschen in Organisationen befasst“ (MÖHRING 1994, S. 5), unterschieden. Die Zielsetzung dieser Arbeit folgt vornehmlich der normativen Entscheidungstheorie, welche dem Entscheider rationales Handeln mit einem in sich widerspruchsfreien Zielsystem und dem entsprechenden Verhalten unterstellt. „Die Darstellung der Handlungsalternativen und ihrer Konsequenzen sowie die Erforschung der Präferenzen von Entscheidern sind die Kernprobleme der normativen Entscheidungstheorie“ (SPRINGER GABLER VERLAG 2013c).

1.4 Definition von Begrifflichkeiten

Im Rahmen dieser Arbeit werden verschiedene Begriffe behandelt, welche im Folgenden kurz dargestellt und definiert werden sollen.

Die Baumart Rotbuche steht im Zentrum dieser Arbeit. Entgegen der üblichen Nomenklatur wird innerhalb dieser Arbeit für diese Baumart der Begriff *Buche* verwendet. Er ist damit nicht gleich zu setzen mit dem Begriff der Baumarten- bzw. Holzartengruppe *Buche*.

Die *Aufarbeitungsintensität* beschreibt das Verhältnis vom aufgearbeiteten Holzvolumen zum gesamten oberirdischen Baumholzvolumen eines Baumes oder einer Krone. Das aufgearbeitete Holzvolumen bezieht sich dabei auf die Einheit *Festmeter ohne Rinde* [Fm o.R.]. Entgegen der üblichen Nomenklatur (vgl. KRAMER 1988, S. 45f) endet der Festmeter nicht an der *Derbholzgrenze* (7 cm Astdurchmesser mit Rinde), sondern bezieht alle aus ökonomischer Sicht aufzuarbeitenden Holzvolumen sowohl unterhalb (*Reisig*; Astdurchmesser < 7 cm) als auch oberhalb der *Derbholzgrenze* (*Derbholz*; Astdurchmesser \geq 7 cm) mit ein. Das gesamte Holzvolumen einer Krone (bzw. eines stehenden Baumes) – bestehend aus *Derbholz* und *Reisig* – wird als *Kronenbaumholz* [Fm o.R.] (bzw. *Baumholz* [Fm o.R.] unter Abzug des Holzes aus dem 30 cm hohen Stubben) definiert und stellt damit das *potentiell nutzbare Kronenholzvolumen* (bzw. potentiell nutzbares Baumholzvolumen) dar. Das im Zuge der Optimierung berechnete nutzbare Kronenholzvolumen (bzw. Baumholzvolumen) wird als *ökonomisch optimal nutzbares Kronenholzvolumen* (bzw. ökonomisch optimal nutzbares Baumholzvolumen) bezeichnet.

⁴ BAMBERG & COENENBERG (2000, S. 1) verwenden eine andere Begrifflichkeit. Statt des Begriffs der normativen Entscheidungstheorie wird die präskriptive Entscheidungstheorie bzw. statt der empirisch-realistischen Entscheidungstheorie wird die deskriptive Entscheidungstheorie verwandt. Die Begrifflichkeiten sind aber synonym (MÖHRING 1994, S. 5).

Zur Beschreibung der *ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität* wird das Verhältnis vom ökonomisch optimal nutzbaren Kronenholzvolumen zum potentiell nutzbaren Kronenholzvolumen genutzt. Ebenfalls findet in diesem Zuge der Begriff des *Grenzzopfes* Anwendung, gemessen in der Einheit Millimeter ohne Rinde [mm o.R.]. An diesem Grenzzopf endet die ökonomisch optimale Aufarbeitung und dieser stellt das ökonomische Optimum aller möglichen *Zopfdurchmesser* dar. Der Zopf ist insbesondere bei der stückbezogenen Betrachtung das dünnere Ende eines ausgehaltenen Sortimentstückes. Als weiterer Durchmesser wird der *Mittendurchmesser*, ebenfalls in der Einheit [mm o.R.], als mittlerer Durchmesser eines aufgearbeiteten Stückes definiert.

Als weiteres Volumenmaß findet der Begriff des *Schaftbaumholzes* Verwendung. Darunter zu verstehen ist das Holzvolumen mit Rinde eines Baumes, berechnet aus dem Integral der jeweilig verwendeten Schaftformfunktion. Dieses Volumen stellt das Volumen des Schaftes ohne Äste dar (KRAMER 1988, S. 45f). Das *Schaftderbholz* ist das Schaftbaumholz bis zur Derbholzgrenze und beinhaltet damit ebenfalls die Rinde.

Im Zuge der Vorstellung der Methodik des Randomized Branch Sampling (RBS) werden die Begriffe *Pfad-/Segment-/Knotenholzvolumen* und *repräsentatives Pfad-/Segment-/Knotenholzvolumen* (jeweils ohne Rinde) verwendet. Unter dem Pfadholzvolumen (ohne repräsentativ) versteht sich die Summe aus den Holzvolumen der einzelnen Segmente/Knoten. Das repräsentative Pfadholzvolumen stellt hingegen das über die Segment-/Knotenvolumen und deren bedingte Auswahlwahrscheinlichkeit berechnete Kronenbaumholz (bzw. Baumholz) dar, welches damit das gesamte oder nur Teile des oberirdischen Kronenbaumholzvolumens (bzw. Baumholzvolumens) repräsentiert. Entsprechend (über die bedingte Wahrscheinlichkeit berechnet) repräsentiert jedes Segment/ jeder Knoten einen Teil des Kronenholzvolumens einer Krone (bzw. Baumholzvolumens eines Baumes).

Bei denen im Rahmen der Zeitverbrauchsstudie aufgearbeiteten Kronenstücken handelt es sich um *Fixlängen* [Stk], welche alle dieselbe Güte und Länge, jedoch unterschiedliche Mitten- und Zopfdurchmesser besitzen.

2 Exkurs: Kronenmorphologie und Holzernte der Buche

In diesem Kapitel wird in kurzen Zügen auf die Zusammenhänge von Wachstum und Kronenbildung sowie auf die Besonderheiten der Holzernte bei der Buche eingegangen.

Die Buche (*Fagus sylvatica* L.) wurzelt entgegen der potentiell natürlichen Vegetation – nach welcher Buchen- und Buchenmischwäldern in Deutschland dominieren würden – nach der zweiten Bundeswaldinventur (BWI²) für Deutschland auf einem Anteil der Waldfläche von 14,8 % (für die Baumartengruppe Buche) (BfN 2013, BMELV 2013). Die Buche gehört zu den Klimaxbaumarten, auf Grund ihrer großen Schattentoleranz und der hohen Intensität ihres Bestandesschattens verfügt sie über eine hohe Konkurrenzkraft. Diese wird zudem verstärkt durch ein lang anhaltendes Höhenwachstum und eine große Kronenplastizität bis ins hohe Alter. Hinsichtlich des Standorts zeigt die Buche eine breite Amplitude, wohingegen sich die Bewirtschaftung vorrangig auf die frischen und mindestens mäßig Nährstoff versorgten Standorte konzentrieren sollte (AID INFODIENST 2007, S. 24F; NLF 2009, S. 6).

2.1 Kronenentstehung und Typisierung

Das Verzweigungssystem ist bei Bäumen genetisch festgelegt. Es wird nach HALLÉ et al. (1978, S. 74ff) auch als *angeborenes Modell* bezeichnet. Das Verzweigungssystem ist vor allem bei Jungpflanzen gut erkennbar und es ist darauf ausgelegt, den über der Pflanze befindlichen Luftraum zu durchdringen und so die Assimilationsfläche zu vergrößern (ROLOFF 1983, S. 48ff). Die Triebe der Buche

wachsen hierbei waagrecht (plagiotrop), lediglich der Terminaltrieb richtet sich verspätet (sekundär) auf. Da sich der Terminaltrieb jährlich aus derselben Terminalknospe bildet, gehört die Buche zu den monopodial verzweigenden Baumarten. Im Gegensatz zu den Nadelbäumen sind die Seitenknospen jedoch nicht quirlförmig am Haupttrieb angeordnet. Auf Grund der Apikaldominanz der Terminalknospe nimmt die Seitentrieblänge zur Terminalknospe hin zu (*Akrotonie*), sodass sich ein stockwerkartiger Aufbau in der Verzweigung erkennen lässt. Die Länge der Triebe wird neben der Akrotonie auch von externen Faktoren wie dem Lichtgenuss und dem Alter des Baumes beeinflusst. Je geringer der Lichtgenuss und je höher das Alter, desto eher bilden sich Kurztriebe. Ebenfalls charakteristisch für die Verzweigung von Buchen sind Kurztriebketten, die sich aus den Endknospen der Kurztriebe über die Jahre hinweg bilden. Kurztriebe können jedoch insbesondere bei Änderung des Lichtgenusses auch zu Langtrieben werden. Die Kurztriebe tragen am gesamten Baum 77 % der Blattmasse, womit ihre Hauptaufgabe in der Assimilation besteht, wohingegen Langtriebe der Eroberung des Luftraumes dienen. Bei der Astreinigung sterben zuerst die Kurztriebe ab, erst in späteren Phasen auch die Langtriebe (ROLOFF 1986, S. 84ff). Ein weiteres Merkmal der Verzweigung der Buchen sind die Astablaufwinkel⁵. Nach HENGST (1964, S. 79ff) unterliegen diese erb- und umweltbedingten Schwankungen und sind ein Weiser für die soziologische Stellung des Einzelbaumes im Bestand. Nach ROLOFF (1983, S. 56) ist der Astablaufwinkel bei Schattbuchen größer als bei Lichtbuchen und vergrößert sich gewichtsbedingt mit dem Alter des Zweiges, sodass dieser von durchschnittlich 40 ° auf bis zu 90 ° bei tief angesetzten Ästen bei Altbuchen steigen kann.

Mit zunehmendem Baumalter wird das Verzweigungswachstum durch eine Vielzahl von Umweltfaktoren in seiner Entwicklung beeinflusst, sodass von dem angeborenen Modell abgewichen wird. Die entstandene Krone adaptiert sich an ihre Umgebung und folgt damit dem *opportunistischen Modell* (HALLÉ et al. 1978, S. 269ff). Häufige Veränderungen hinsichtlich des Verzweigungswachstums werden durch Verletzung oder Verlust der Terminalknospe hervorgerufen, sodass in der Folge eine Proventivknospe die Aufgabe der Terminalknospe übernimmt und es somit zu Reiterationen kommt. Durch die Akklimation der Kronen an ihre Umwelt und durch ihre genetische Ausstattung können typische Kronentypen entstehen, welche im Folgenden vorgestellt werden.

Eine sehr verbreitete Kronen-Klassifizierung stellt HENGST (1964, S. 79f) vor. Er klassifizierte auf 29 Ertragsprobestflächen im Erzgebirge die vorgefundenen 99 bis 155 Jahre alten Buchen auf Grund ihrer Schaftachse und Astablaufwinkel in

⁵ Hierbei handelt es sich um den Winkel zwischen der Stammachse und dem Seitentrieb.

drei Hauptkronentypen⁶ (vgl. auch ARNSWALD 1951, S. 174; KRAHL-URBAN 1953, S. 246f; KRAHL-URBAN 1955, S. 402f; KRAHL-URBAN 1962, S. 29f; ROLOFF 1986, S. 90). Der *wipfelschäftige Typ* (Abbildung 1 rechts) beschreibt Bäume, deren Schaftachse durchgehend ist und deren Äste nahezu waagrecht vom Schaft abgehen (Astablaufwinkel zwischen 65 ° und 90 °). Sie entsprechen damit am ehesten dem forstlichen Ausleseziel mit dem vornehmlichen Ziel der Wertholz- bzw. Stammholzproduktion. Bäume hingegen mit einem *besenförmigen Kronentyp* (Abbildung 1 mittig) weisen einen Astablaufwinkel von 65 ° bis 75 ° und eine Auflösung der Schaftachse im oberen Viertel der Baumhöhe auf. Die in der Krone abgehenden, schräg aufwärts strebenden Haupt- und Nebenäste ergeben ein charakteristisches, besenartiges Gebilde. Nach der Studie von HENGST (1964, S. 80) handelt es sich bei diesem Kronentyp um den in der Natur am häufigsten anzutreffenden Typ, wohingegen der wipfelschäftige Typ am seltensten auftritt. Der dritte Kronentyp weist besonders spitze Astablaufwinkel von etwa 10 ° auf und wird als *Zwieseltyp* (Abbildung 1 links) bezeichnet. Zudem findet die Auflösung der Schaftachse deutlich unter dem oberen Viertel der Baumhöhe statt, mit der Folge, dass die Bäume hinsichtlich der Ausdehnung deutlich voluminösere Kronen besitzen. Auch RICHTER (1990, S. 12) bestätigt, dass mit sinkender Schaftlänge die Astablaufwinkel sinken. Diese Typen stehen durch ihre kurze Schaftlänge dem forstlichen Produktionsziel entgegen und werden in der Regel in Zuge der Auslesedurchforstungen bevorzugt entnommen.

⁶ Der Bukettkronentyp ist eine Sonderform des wipfelschäftigen Typs und wird daher hier nicht als Haupttyp behandelt.

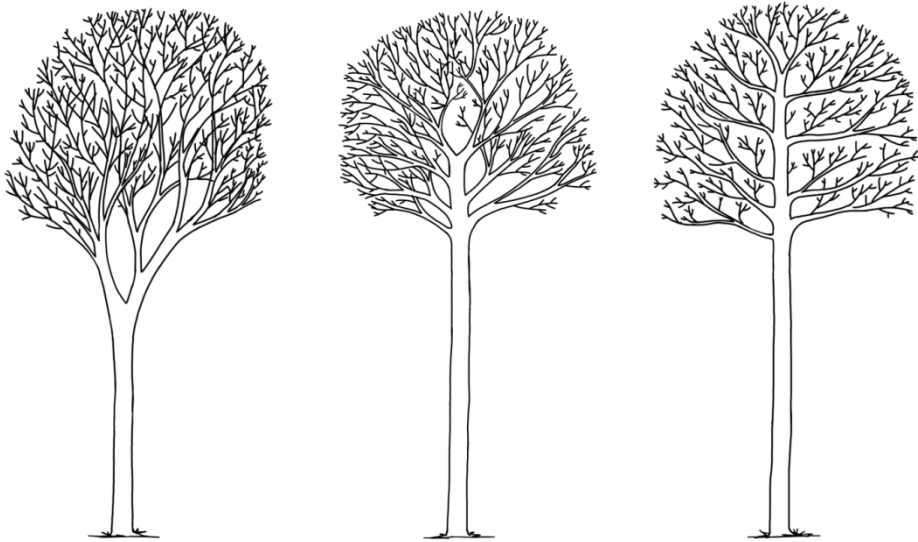


Abbildung 1: Zwieselförmiger (links), besenförmiger (mittig) und wipfelschäftiger (rechts) Kronentyp bei Buchen (Eigene Darstellung)

Die Studie von HENGST (1964) aufgreifend versucht RICHTER (1990, S. 11f) in Naturwaldparzellen in Nordrhein-Westfalen eine differenziertere Kronenklassifikation zu erstellen, in dem er die einzelnen Kronenmerkmale unabhängig voneinander und in einem höheren Detaillierungsgrad erfasst. Als Ansprechkriterium gilt bspw. die relative Schaftlänge, welche in 10 % Stufen angesprochen wird, oder der Ablaufwinkel des stärksten konkurrierenden Astes (ebenfalls in 10 % Stufen). In den Ergebnissen wurden die einzelnen Merkmale miteinander in Beziehung gesetzt und diese hinsichtlich einer Plusbaum-Variante ausgewertet. Hierbei wurde deutlich, dass mit größer werdendem Astablaufwinkel die relative Schaftlänge zunimmt, gleichzeitig aber der Anteil der Buchen mit einem Astablaufwinkel größer 65° (und damit entsprechend langen Schäften bzw. in der Gruppe der wipfelschäftigen Kronentypen) nur zwischen 2 und 7 % der Individuen in den Versuchspartellen umfasst. Interessant ist, dass nach RICHTER (1990, S. 13) die Astabgangswinkel steiler werden, je höher der Brusthöhendurchmesser ist. Weiterhin hebt RICHTER (1990, S. 14) hervor, dass die weitgehende Begünstigung langschäftiger Bäume (Plusbäume) damit auch zu Ertragsverlusten führen kann.

Neben den Astablaufwinkeln spielt das Ende des Stammbereiches mit der Auflösung des Stammes in einzelne Verzweigungen (Zwiesel) bei der Einordnung in Kronentypen eine entscheidende Rolle. Grundsätzlich stellt sich dabei immer die Frage, ob es sich bei der Verzweigung um einen Steilast (zumeist dünnerer Seitenast) oder um einen Zwiesel (stärkerer Seitenast bzw. Entstehen von zwei Hauptästen) handelt, wobei ein abgehender Steilast i.d.R. nicht die Auflösung des

Stammes mit sich zieht. Die Höhe des vermuteten Zwiesels ist recht einfach mit entsprechenden Messgeräten (z. B. mit dem Forestor-Vertex IV/M von Haglöf) zu messen, eine Messung der am vermuteten Zwiesel ansetzenden Astdurchmesser ist jedoch auf Grund der großen Entfernung zum Objekt meist nicht möglich. In solchen Fällen behilft man sich mit visuellen Schätzungen. Für die Klassifikation von Zwieseln und Steilästen existiert eine Vielzahl von Definitionen (vgl. BÖRNER et al. 2003, S. 276; RICHTER 1990, S. 12; BÖSCH 2010, S. 5; RUMPF 2011, S. 34), welche eine grobe Einschätzung der Verzweigungssituation erlauben. Nach RICHTER (1990, S. 12) bspw. endet der Schaft dort, wo „ein konkurrierender Ast an seiner Basis mindestens 80 % des Durchmessers des Hauptschaftes aufweist, und/oder im Bereich der Krone der Schaft um mindestens 20 ° aus der Vertikalen abbiegt“. In den von BÖRNER et al. (2003, S. 276) beschriebenen Aufnahmestandards für junge bis mittelalte Laubhölzer endet der Schaft bei einem Zwiesel von „mind. 75 % der Stärke und 75 % der Länge des stärkeren“ Triebes. BÖSCH (2010, S. 5) hingegen definiert in der Aufnahmeanweisung für das RBS-Verfahren die Auflösung des Stammes und damit den Beginn der Krone rein morphologisch bei einem Astansatz (sowohl Zwiesel als auch Steiläste) von größer als 5 cm und einem Kontakt des Astes zur Krone, wohingegen RUMPF (2011, S. 34) Steiläste unberücksichtigt lässt und den Kronenansatz unterhalb des ersten Astes mit Astbasisdurchmesser größer als 1/5 des Stammdurchmessers oder bei Beginn einer typischen Kronenstruktur definiert. Die beiden letzten Autoren messen auf Grund des Aufnahmeverfahrens die Verzweigungsstärke im liegenden Zustand und definieren mit dem Ende des Stammbereiches gleichzeitig den Kronenansatz. Nach NAGEL (2001, S. 18) hingegen wird im Versuchswesen der Ansatz des ersten grünen Primärastes – unabhängig von dessen Stärke – als Kronenansatz verstanden.

Grundsätzlich besteht insbesondere bei der Buche häufig das Problem, dass der Schaft sich erst im Kronenbereich auflöst und somit bei Volumenberechnungen Stammholz zum Kronenholzvolumen gezählt werden kann. Bei Tiefzwieseln hingegen löst sich der Schaft deutlich unterhalb der Kronenstruktur auf, sodass je nach Definition das Holz zwischen Zwiesel und Kronenbereich zum Stamm- oder Kronenholzvolumen gerechnet werden kann.

2.2 Besonderheiten der Buchenholzernte

In diesem Kapitel sollen allgemeine aber auch speziell für die Buche typische Eigenarten der Holzernte kurz aufgezeigt werden. Die Holzernte in Laubholzbeständen ähnelt in weiten Teilen derjenigen in Nadelholzbeständen. Die Liste der Besonderheiten ist hier nicht auf Vollzähligkeit ausgelegt, sondern sie soll die für die spätere Modellbildung relevanten Punkte aufzählen und die Bedeutung der Besonderheiten erklären.

Die Wahl des Holzernteverfahrens resultiert aus einer Vielzahl unterschiedlicher Ausgangsbedingungen wie bspw. dem BHD des ausscheidenden Bestandes, der Art der auszuhaltenden Sortimenten, der Topographie, der Verfügbarkeit von Unternehmern oder das Vorhandensein von Naturverjüngung. Hochmechanisierte Holzernteverfahren zeigen ihre Stärke vor allem in schwächer dimensionierten Laubholzbeständen (vgl. PAUSCH 2007, S. 746; SCHORR 2000, S. 522; GUGLHÖR 1994, S. 698). Bis zu einem mittleren Baumvolumen des ausscheidenden Bestandes von 0,4 Fm liegt die Leistung der hochmechanisierter Erntemaschinen in Laubholzbeständen auf demselben Niveau wie in Nadelholzbeständen (PAUSCH & PONTIZ 2002, S. 12). Darüber jedoch mindern nach SUCHOMEL (2008, S. 30) vor allem Starkäste, Zwiesel und krumme Schäfte die Aufarbeitungsleistung der hochmechanisierten Erntesysteme in der Laubholzernte. Nach GUGLHÖR (1994, S. 697) benötigen zudem zwieselige Buchen circa 30 % mehr Aufarbeitungszeit als wipfelschäftige Buchen. Nach SCHORR (2000, S. 522) hingegen werden bei Buchen mit BHD von 15 bis 30 cm für die Aufarbeitung eines starkastigen Baumes 35 Sekunden, für einen zwieseligen Baum 44 Sekunden mehr gegenüber einem feinastigen Baum verbraucht. Die Aussagen der von SCHORR (2000) befragten Harvesterfahrer bestätigten diese Klassifikation.

Für die Ernte in starken Laubholzbeständen wird i.d.R. die motormanuelle Aufarbeitung empfohlen. Ist der Zeitverbrauch für die motormanuelle Aufarbeitung im Stammbereich über alle Baumartengruppen annähernd gleich (JACKE 2011, S. 2ff), so ist im Gegensatz zu der hochmechanisierten Holzernte der Zeitverbrauch für die motormanuelle Kronenaufarbeitung in starken Nadelbäumen fast doppelt so hoch wie bei gleichstarken Laubbäumen (vgl. Abbildung 2. Nach dem Erweiterten Sortentarif beträgt bei Mittendurchmessern von 8 bis 30 cm der Zeitverbrauch in der Buche bzw. Eiche zwischen 43 und 51 % derjenigen in der Fichte bzw. Tanne (für Industrieholz lang, Kronen-Kranlängen, unvermessen und gezählt) (JACKE 2011, S. 27f).

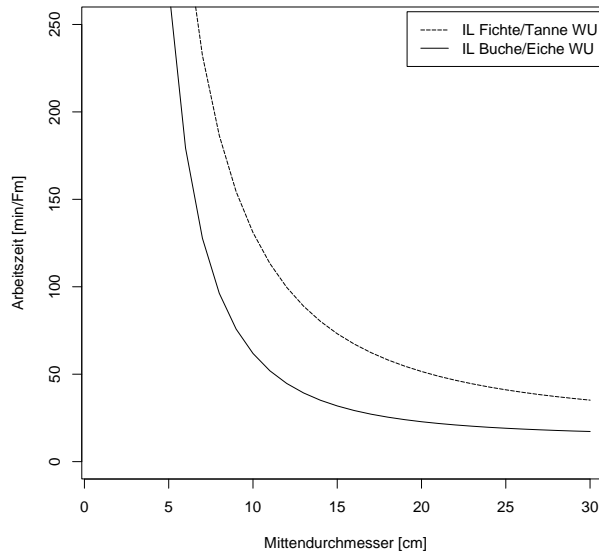


Abbildung 2: Vorgabearbeitszeit [min/Fm] nach Tabelle 22 des Erweiterten Sortentarifs (EST) für die Aufarbeitung von Fichten- bzw. Buchen-Industrieholz (IL: Industrieholz lang; W = Kronen-Kranlängen; U = unvermessen und gezählt).

Die Rückeleistung ist (weitestgehend) unabhängig von der Baumart, -dimension bzw. der -morphologie. Sie wird vorwiegend bestimmt durch das Stückvolumen bzw. damit auch von der Sortimentsaushaltung. Weitere Einflussfaktoren sind bspw. die Rückeentfernung, der Schleppertyp oder die Anzahl der Sortimente (vgl. AFL 2012, S. 180).

Grundsätzlich kommt es beim Laubholz im Zuge des Fällprozesses durch die Wucht des Aufpralls auf den Erdboden zu Schäden durch Astabbrüche oder -splitterungen insbesondere im Kronenbereich. Auch kommt es zu Überlagerungen von gefällten Kronen, sodass insbesondere bei der motormanuellen Aufarbeitung der Zugriff auf potentiell aufzuarbeitendes Kronenmaterial eingeschränkt ist. Auch können topografische Besonderheiten oder Naturverjüngungsbereiche die Holzernte erschweren. Diese und noch weitere Einflüsse können die im Wald zu realisierenden Nutzungsmengen bzw. Aufarbeitungsintensitäten weiter reduzieren.

3 Methodische Grundlagen zur Ermittlung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität

In diesem Hauptkapitel werden die produktions- und kostentheoretischen Grundlagen für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität am Beispiel der Baumart Buche gelegt.

Eingeleitet wird das Hauptkapitel mit den Grundlagen der betriebswirtschaftlichen Modellbildung (Kapitel 3.1) und Verfahren bzw. Methoden (Kapitel 3.2), welche zur Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität Anwendung finden. Es folgt darauf eine Beschreibung der allgemeinen produktions- und kostentheoretischen Zusammenhänge für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Laubbäumen (Kapitel 3.3 und 3.4). Auf eine umfassende Einführung in die Grundzüge der Produktions- und Kostentheorie wird hier bewusst verzichtet. Für weitere Studien sei hier auf die betriebswirtschaftlichen Standardwerke von WÖHE & DÖRING (2000), HEINEN (1983) und SCHMALENBACH (1956) verwiesen. Weiterhin sei darauf hingewiesen, dass die Bereitstellung von Rohholz durch die Aufarbeitung und Rückung von Stücken von Laubbäumen nur als ein Teil der vielschichtigen und umfangreichen forstlichen Produktion (vgl. SPEIDEL 1983, S. 26ff) anzusehen ist. Die in dieser Arbeit behandelten produktions- und kostentheoretischen Zusammenhänge sind jedoch nur auf den Teilbereich der Holzernte beschränkt.

Im darauf anschließenden Unterkapitel wird die betriebliche Kostenrechnung und darin die Anwendung des Grenzwertprinzips im forstlichen Rechnungswesen vorgestellt (Kapitel 3.5). Zum Abschluss des Hauptkapitels werden in einem für die weitere Arbeit zentralen Unterkapitel 3.6 die Grundbedingungen für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität am Beispiel der Baumart Buche aufgezeigt.

3.1 Betriebswirtschaftliche Modelle

Nach BAMBERG & COENENBERG (2000, S. 13) zeichnen sich Modelle durch zwei Eigenschaften aus. Einerseits sind Modelle „*vereinfachte Abbilder* realer Tatbestände ...“, wobei sich die Abbildung auf die Elemente und deren Eigenschaften sowie die zwischen den Elementen und deren Eigenschaften bestehenden Relationen des Realsystems bezieht. Andererseits wird im allgemeinen[sic!] an den Modellbegriff bzw. an die Qualifikation als wissenschaftliches brauchbares Modell die Forderung gestellt, daß[sic!] trotz aller Vereinfachungen *Strukturgleichheit* bzw. *-ähnlichkeit* zwischen Realsystem und Modell vorliegt“. Vereinfachung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass „nur die unter der jeweiligen Fragestellung relevanten Elemente des Realsystems ... im Modell erfasst“ (BAMBERG & COENENBERG 2000, S. 13) werden. Durch die Reduktion der Komplexität der Realität auf die für das Modell relevanten Elemente entsteht ein abstrahiertes Abbild der Realität (*isolierende Abstraktion*) (WÖHE & DÖRING 2000, S. 36), in dem auch die Systemrelationen abgebildet werden müssen, um Strukturgleichheit bzw. -ähnlichkeit zu gewährleisten.

Betriebswirtschaftliche Modelle wiederum lassen sich u.a. hinsichtlich der Zielsetzung des Modells in drei Klassen einteilen: *Beschreibungsmodelle*, *Erklärungsmodelle* und *Entscheidungsmodelle* (WÖHE & DÖRING 2000, S. 39f). Während Beschreibungsmodelle der Abbildung von empirischen Erscheinungen ohne deren weiteren Analyse bzw. Erklärung dienen, werden Erklärungsmodelle vorwiegend für die Beurteilung betrieblicher Prozessabläufe verwendet. Entscheidungsmodelle hingegen haben „die Aufgabe, die Bestimmung optimaler Handlungsmöglichkeiten zu erleichtern. Sie suchen nach Mitteln zur optimalen Realisierung eines Zieles, d.h. sie übertragen die in einem Erklärungsmodell gewonnenen Erkenntnisse auf einen praktischen Anwendungsbereich. Dabei werden in der Regel mehrere Variablen innerhalb bestimmter Nebenbedingungen in der Weise festgelegt, daß[sic!] die Zielfunktion dieser Variablen einen Extremwert annimmt (z. B. Gewinnmaximierung, Kostenminimierung)“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 40). Auf Grund der in die Zukunft gerichteten Modellaussagen werden hinsichtlich der Art der Annahmen über das Eintreten zukünftiger Ereignisse wiederum drei verschiedene Modelltypen unterschieden: Deterministische, stochastische und spieltheoretische Modelle. Für die Aufarbeitung von Bäumen sollten im Gegensatz zur langfristigen forstlichen Produktion (vgl. MÖHRING et al. 2010, S. 26ff) *deterministische Modellannahmen* zutreffend sein. In diesen wird unterstellt, dass „ein Ereignis mit 100%iger Wahrscheinlichkeit, d.h. mit völliger Sicherheit eintritt. Die Ergebnisse der einzelnen Handlungsalternativen werden als bekannt vorausgesetzt. Jeder Variablen können eindeutige Werte beigelegt werden“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 40).

3.2 Operation Research

Unter der Bezeichnung Operation Research (kurz: OR) werden mathematische Verfahren und Methoden zur optimierten Lösung betrieblicher Planungs- und Koordinierungsprobleme zusammengefasst (WÖHE & DÖRING 2000, S. 164). Nach HOMBURG (2000, S. 36) handelt es sich bei den mathematischen Optimierungsmodellen des OR um die „bekanntesten Entscheidungsmodelle“, welche sich normalhin aus ein oder mehreren Entscheidungsvariable/n, dem Zielsystem sowie aus ein oder mehreren Restriktion/en (HOMBURG 2000, S. 36) zusammensetzen. Auf die Optimierungsmodelle kann sowohl während der Entscheidungsvorbereitung, bei der Entscheidungsfindung, nach der Entscheidungsdurchführung und zur Entscheidungskontrolle zurückgegriffen werden. Die Vorteile der mathematischen Formulierung und deren Umsetzung durch die EDV sind in der Berechnung von umfangreichen Problemlösungen zu finden. Die Schwierigkeit besteht jedoch – wie bei jedem mathematischen Modell – in der Auswahl der zu treffenden Prämissen.

Nach HOMBURG (2000, S. 42) lässt sich das Wesen des OR durch die folgenden vier Merkmale beschreiben:

1. „Optimalitätsstreben: Es wird die Optimierung (Maximierung oder Minimierung) von Zielsetzungen angestrebt, sofern das Optimum bestimmbar ist.
2. Analytische Vorgehensweise in Modellen: Das Denken und die Analyse erfolgen in Modellen.
3. Quantifizierung: Das zugrundeliegende Entscheidungsproblem muß[!] mit mathematischen, formalen Mitteln darstellbar und lösbar sein.
4. Entscheidungsvorbereitung: Es werden mit OR-Modellen keine Entscheidungen getroffen, sondern lediglich vorbereitet. Abweichungen der real getroffenen Entscheidungen von der Modellentscheidung können durch die Unvollständigkeit der im Modell formulierten Nebenbedingungen oder auch durch subjektive Präferenzen der Entscheidungsträger bedingt sein.“

Durch die Anwendung von OR-Verfahren im Rahmen der Entscheidungsvorbereitung wie bspw. der Netzplantechnik oder der Simulation entstehen Beschreibungs- und Erklärungsmodelle. Die Entscheidungsfindung hingegen beruht entweder auf statischen Verfahren wie bspw. der linearen Programmierung (LP), der diskreten LP und der nicht-linearen Programmierung, oder auf dynamischen Verfahren wie bspw. der dynamischen Programmierung (STEPAN & FISCHER 2009, S. 279). Insbesondere die dynamische Programmierung findet in jüngerer Zeit Anwendung in der forstlichen Wissenschaft (BONT 2005, S. 4f; MURPHY 2012; SCHÖPFER et al. 2004, S. 263). Hierüber lassen sich mehrstufige Entscheidungsprozesse wie bspw. die Sortimentsaushaltung am Einzelstamm optimieren. Bei der auf Bellman (STEPAN & FISCHER 2009, S. 283ff) zurückgehenden Optimierungs-

technik wird das Optimierungsproblem in mehrere Teilprobleme zerlegt und anschließend für jedes Teilproblem die optimale Lösung bestimmt. Das Optimalitätsprinzip von Bellman sieht vor, dass die optimale Gesamtlösung aus einer Kombination aller optimalen Teillösungen besteht, wobei die Bestimmung der optimalen Kombinationen in einem rekursiven Prozess über alle Entscheidungsstufen hinweg abläuft (WÖHE & DÖRING 2000, S. 171). Ein Vorteil der dynamischen Programmierung ist bspw. die freie Verwendung von ganzzahligen oder nur diskrete Werte annehmenden Variablen, welche insbesondere bei der linearen und nicht-linearen Programmierung zu Schwierigkeiten führen.

Die Anwendung von Verfahren des OR kommt jedoch häufig an seine Grenzen (WÖHE & DÖRING 2000, S. 171f). Die Ursachen hierzu liegen in der teils schwer möglichen Beschaffung der notwendigen Daten, der Verwendung von mathematischen Modellen, welche streng kausale Beziehungen zwischen den einzelnen Variablen vorsehen, und auch durch die Lösungsverfahren selbst, welche nicht in der Lage sind, bei komplexen nicht-linearen Problemen eindeutig optimale Kombinationen zu bestimmen. Nicht zuletzt ist die Erstellung der Modelle sehr aufwendig, sodass diese in der betrieblichen Praxis immer hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit hinterfragt werden sollten.

3.3 Grundlagen der technischen Rohholzproduktion

Die in diesem Kapitel vorgestellten Grundlagen der technischen Rohholzproduktion am Einzelbaum umfassen – wie im folgenden Kapitel 3.4 – die Zeitspanne von der Aufarbeitung des Rohholzes nach der erfolgten Fällung des Baumes bis zur Rückung an den Waldweg. Unter dem Begriff der *Produktion* wird somit die Bereitstellung von *Rohholz frei Waldweg* durch den Einsatz von Produktionsfaktoren bei der Aufarbeitung und Rückung (Input) verstanden. Als Produktionsfaktoren werden dabei lediglich solche angesehen, durch deren Verbrauch Kosten entstehen. Der Baum bzw. das Holzvolumen gehört folglich in der hier verwandten Definition nicht zu den Produktionsfaktoren, da deren Entstehungskosten vor der Produktion (sowie sie in dieser Arbeit definiert ist) anfallen. Zudem wird das Holzvolumen auch nicht verbraucht, sondern lediglich in einzelne Teile (Sortimente) zerlegt. Aus diesem Grund wird im Rahmen der produktions- und kosten-theoretischen Ausführungen der Einzelbaum allgemein mit dem Begriff *Objekt* bezeichnet.

Als einheitliche Volumeneinheit findet für das Rohholz der *Festmeter ohne Rinde* [Fm o.R.] Verwendung. Die Ausführungen umfassen die Ernte und Rückung von (Sortiments-)Stücken wie bspw. Laubindustrieholz, eine Bereitstellung von Hackgut zur energetischen Nutzung wird in dieser Dissertationsschrift hingegen nicht behandelt.

3.3.1 Heterogenes Objekt Laubbaum

Ein Baum kann bekannter Maßen in die Kompartimente Baumwurzel, Baumstamm und Baumkrone eingeteilt werden. Relevant für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität ist in dieser Arbeit nur das oberirdisch vorhandene Baumholz, welches nach der Fällung zum Produkt Rohholz (vgl. Kapitel 3.3.3) aufgearbeitet werden kann. Wichtig ist es, bei den folgenden Ausführungen den eigentlich trivialen Punkt zu beachten, dass das Baumholzvolumen eines jeden Baumes endlich ist und somit die Produktion nicht beliebig erweitert werden kann. Das Baumholzvolumen in der Einheit Fm o.R. stellt das gesamte verfügbare Potential für die Produktion dar.

„Der Stamm ist der wirtschaftlich wichtigste Teil des Baumes“ (KRAMER 1988, S. 31). In diesem Bereich liegt ein Großteil des Baumholzes in aggregierter Form ähnlich eines Kegelstumpfes vor, wobei der Durchmesser des Stammes entsprechend seiner Abholzigkeit zur Krone hin abnimmt. Je älter ein Baum desto stärker sind die Stammdurchmesser- und -längendimensionen bzw. desto größer (u.a. in Abhängigkeit von der Baumart und der waldbaulichen Behandlung) ist der astfreie Stammbereich. Die Stammachse läuft bei den Nadelbäumen noch weit in den Kronenbereich hinein, bei Laubbäumen hingegen ist ein streng orthotropes Wachstum mit einer eindeutigen Zentralachse die Ausnahme und daher endet diese i.d.R. mit dem Kronenansatz (SCHMIDT 2001, S. 48).

„Die Kronenform der Waldbäume ist vielgestaltig“ (KRAMER 1988, S. 16), da sich insbesondere bei der Laubbaumkrone die Stammachse zur Eroberung des Luftraumes in mehreren Stufen in eine Vielzahl von Schaftachsen bzw. Ästen, an welchen wiederum Äste bzw. zuletzt die Blätter als Träger des Assimilationsapparates hängen, aufteilt. Daraus resultiert für den Bereich der Lichtkrone bspw. der Buche die Form eines kubischen Paraboloides bzw. für den Schattkronenbereich die Form eines Kegelstumpfes, während die Lichtkrone einer Fichte eher einem Kegelspitz gleicht (PRETZSCH 1992, S. 112f). Die Verzweigung in der Krone kann über die Astlängen und deren Abfolge, die Astwinkel und die Astformen näher beschrieben werden. Grundsätzlich ist die Verzweigung von Baumarten nicht zufällig, sondern erfolgt anhand von baumartentypischen und damit genetisch festgelegten Verzweigungsmustern, welche durch *konzeptionelle Architekturmodelle* näher beschrieben werden können (MATYSSEK et al. 2010, S. 141). Diese baumartentypischen Verzweigungsmuster können an jungen Pflanzen oder bei Reiterationen beobachtet werden. Mit zunehmendem Alter unterliegen sie jedoch verschiedensten Umwelteinflüssen wie bspw. dem Standraum, Standortfaktoren wie Hangneigung und Wind oder Schadeinflüssen wie Terminalknospenverletzungen und Astabbrüchen, wodurch der Phänotyp der Krone von dem genetisch fixierten Verzweigungsmuster abweicht (KRAMER 1988, S. 16). Entsprechend der Zunahme der Stammdimensionen steigen mit dem Alter auch die Ausmaße der Krone sowohl hinsichtlich Länge als auch Breite.

Abbildung 3 zeigt ein vereinfachtes Verzweigungsmuster einer möglichen Baumkrone mit vier Verzweigungsordnungen und jeweils zwei Astansätzen je Verzweigung, wobei hier ein Ast als das Verbindungstück zwischen zwei Verzweigungspunkten angesehen wird. Mit jeder weiteren Ordnung verjüngen sich zur Baumspitze hin die Verzweigungswinkel gleich stark über beide Seiten der Krone, lediglich auf der rechten Kronenseite variieren zusätzlich die Astlängen. Deutlich wird hierbei, dass allein durch die Variation der Astlängen das Erscheinungsbild der rechten Kronenhälfte sich deutlich verändert bzw. sie heterogener ist. Wird zudem berücksichtigt, dass bspw. eine Buche bis zu acht Astordnungen⁷ (WIESNER 1907, S. 147) besitzen kann und neben den Astlängen zusätzlich eine stärkere Variation der Verzweigungswinkel vorherrscht, so steigt der Komplexitätsgrad der Krone drastisch an.

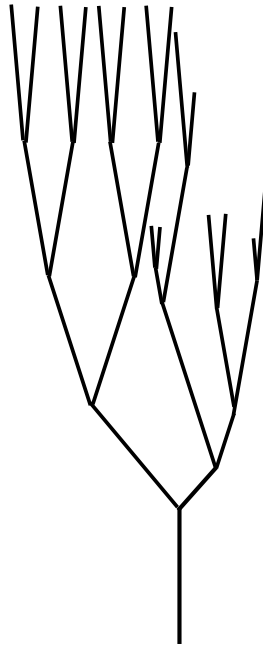


Abbildung 3: Vereinfachtes Verzweigungsmuster einer Baumkrone mit vier Ordnungen, jeweils zwei Astansätzen je Verzweigung und homogenen (links) bzw. inhomogenen (rechts) Astlängen (Eigene Darstellung).

⁷ Theoretisch müssten entsprechend dem jährlichen Wachstum die Anzahl der Astordnungen am Baum den Umfang $n = (\text{Alter} - 1)$ besitzen. Durch Absterben oder Abbrechen der Äste reduziert sich die Anzahl der vorzufindenden Astordnungen deutlich (WIESNER 1907, S. 145).

Für den gesamten Baum gilt, dass die Stamm-/Astdurchmesser vom Stammfuß bis zu den Knospen hin abnehmen. Unter dem Begriff der *Abholzigkeit* „versteht man die Durchmesserabnahme in cm je laufender Meter Schaftlänge. Ein Stamm ist vollholzig, wenn die Durchmesserabnahme je laufenden Meter Schaftlänge weniger als 1 cm und abholzig, wenn die Abnahme mehr als 1 cm beträgt“ (KRAMER & AKCA 1987, S. 60). Dass die Abholzigkeit bei Laubbäumen jedoch keineswegs durchgehend gleich stark bzw. abnehmend sein muss, belegt die Arbeit von HUSMANN (2013, S. 82) in Bezug zur Baumart Buche.

Ein Laubbaum ist somit ein vergleichsweise heterogenes Objekt. Die Heterogenität schlägt sich sowohl im Bereich des Stammes (Längen- und Durchmesserdimension des Stammes, astfreie Schaftlänge, Abholzigkeit) als auch in der Krone (Längen- und Durchmesserdimensionen der Äste, Verzweigungsanzahl und -abfolge, Anordnung der Äste im Kronenraum, Verzweigungswinkel, Abholzigkeit u.v.m.) nieder. Hinsichtlich der Morphologie in der Krone sind jedoch zumindest baumartentypische Verzweigungsmuster zu erkennen.

3.3.2 Stückmassegesetz

Die Zusammenhänge zwischen der Menge eingesetzter Zeiteinheiten und dem Volumen von Rohholzstücken bei der motormanuellen Holzernte hat HILF (1928) bereits im Jahr 1928 in Form des sog. *Stückmassegesetzes*⁸ theoretisch beschrieben. SPEIDEL (1952, S. 15f) formulierte in seiner Dissertation anschließend dazu die mathematischen Zusammenhänge des Stückmassegesetzes sowie auf Basis des Einheitstarifs für Hauerlöhne (EHT) Standardwerte für die Berechnung von Vorgabezeiten für die manuelle Aufarbeitung⁹. Das Stückmassegesetz beschreibt formal die gesetzmäßige Abhängigkeit der Vorgabezeit¹⁰ [min] von dem Volumen¹¹ [Fm o.R.] (= Volumeneinheit) bzw. dem Stück [Stck] des ausscheidenden Bestandes (SPEIDEL 1952, S. 6). Es kann nach SPEIDEL (1952, S. 37) unab-

⁸ Auf Grund des Bezugs zur Volumeneinheit Fm und nicht zu einer Masseneinheit ist der sprachlich treffendere Begriff das „Stückvolumengesetz“. Da sich jedoch der Begriff des Stückmassegesetzes bis heute in der forstlichen Fachsprache gehalten hat, wird sie auch in dieser Arbeit weiter verwendet. Zur Beschreibung des Gesetzes wird aber mit der Einheit Volumen die richtige Einheit verwendet.

⁹ Die Arbeit von SPEIDEL wurde in einer Zeit verfasst, in welcher mit einer Handsäge die Stämme aufgearbeitet wurden. Die Zusammenhänge können aber auch für die heutigen motormanuellen Verfahren gelten.

¹⁰ Der Begriff der Vorgabezeit wird im Folgenden durch den Begriff des Zeitverbrauchs ersetzt.

¹¹ Entgegen der von SPEIDEL (1952) genutzten Nomenklatur „Masse“ ist der sprachlich korrekte Begriff das „Volumen“.

hängig von der Holzart und der Holzsorte durch die Formel 1 mathematisch beschrieben werden, wobei sich der Zeitverbrauch T_{Fm} je Volumeneinheit aus zwei für die Holzart bzw. der entsprechenden Holzsorte konstanten Parameter A und B sowie aus dem Volumen des Mittelstammes des ausscheidenden Bestandes m berechnet. Damit besteht die Funktion aus einer konstanten Komponente A , welche in ihrer Größe unabhängig von dem Volumen des Mittelstammes ist, und einer mit dem Volumen des Mittelstammes variablen Komponente $\frac{B}{m}$.

$$T_{Fm} = A + \frac{B}{m} \quad \text{Formel 1}$$

Die Zeitverbräuche je Volumeneinheit weisen in Abhängigkeit von dem Volumen des Mittelstammes des ausscheidenden Bestandes einen hyperbelförmigen Verlauf auf (

Abbildung 4). Sie sinken mit steigendem Volumen des Mittelstammes des ausscheidenden Bestandes (bzw. fallender Stückzahl je Volumeneinheit) auf der Ordinate nach gegen die Größe des Parameters A . Der Zeitverbrauch je Volumeneinheit liegt in den schwächeren Dimensionen überproportional höher als in den stärkeren Dimensionen.

Der stückbezogene Zeitverbrauch berechnet sich aus dem Produkt von Zeitverbrauch je Volumeneinheit und des Stückvolumens des Mittelstammes des ausscheidenden Bestandes (Formel 2) und steigt mit steigendem Stückvolumen linear an.

$$T_{Stck} = T_{Fm} * m = m * A + B \quad \text{Formel 2}$$

Der Schnittpunkt beider Funktionen fällt folglich auf das Stückvolumen von 1,0 Fm. Sowohl aus dem Schnittpunkt des stückbezogenen Zeitverbrauchs mit der Ordinate nach als auch aus dem Kurvenverlauf des festmeterbezogenen Zeitverbrauchs wird deutlich, dass der Zeitverbrauch sich aus fixen und variablen Bestandteilen zusammen setzt. Nach SPEIDEL (1952, S. 29) handelt es sich bei den fixen Bestandteilen um „Nebenzeit[, die...] sich bei jedem Stamm, ohne durch dessen [Volumen] ... beeinflusst zu werden“ wiederholt. „Die Nebenzeit wird vermutlich aus den Leerlaufzeiten des Werkzeuges gebildet. – Der Führung eines Sägeschnittes geht z. B. die Zeit für das Anreichen der Säge, die Zeit bis zum Erfassen der Griffe und die Zeit für das „Zielen“ mit der Säge voraus. Ein weiterer Leerlauf des Werkzeuges ist durch die Zeit bei der Umkehr des Sägezuges gegeben, und schließlich folgt die Zeit für das Herausziehen der Säge zwischen den beiden nunmehr entstandenen Teilen und das Absetzen der Säge“. Die Hauptzeit wird hingegen durch die variable Komponente zum Ausdruck gebracht und „steigt mit [dem Volumen] ... des Mittelstammes des ausscheidenden Bestandes. Sie dürfte mit der Wirkungszeit des Werkzeuges übereinstimmen“ (SPEIDEL 1952, S. 30). Weiterhin weist SPEIDEL (1952, S. 29) darauf hin, dass auch die Hauptzeit weiter in fixe und variable Komponenten zerlegt werden könnte. Die forstlichen Zeitstudien zu dieser Zeit reichen jedoch nicht aus, „um die Zergliederung der

Koeffizienten bis in die kleinsten meßbaren[sic!] Elementarzeiten durchzuführen“ (SPEIDEL 1952, S. 30). Für dieses Problems sieht SPEIDEL (1952, S. 30) nur eine Lösung: „Der beste Zeitnehmer im Dienste des beschriebenen Verfahrens wird der Film sein. Er lässt eine gewissenhafte Feststellung von Schnittpunkten zwischen Haupt- und Nebenzeiten und ihre genaue Auswertung zu“. Für weitere Informationen bezüglich des Stückmassegesetzes sei auf SPEIDEL (1952) verwiesen.

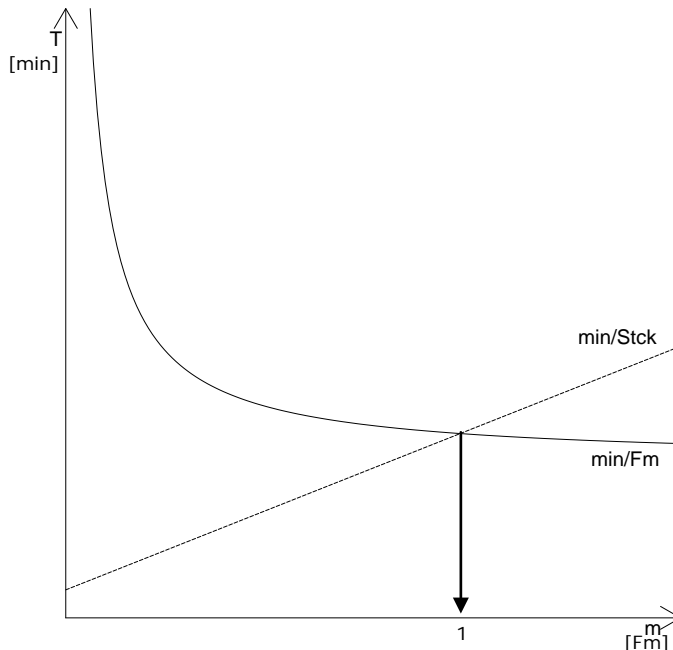


Abbildung 4: Vorgabezeit in Minuten je Fm bzw. Stück (entsprechend Formel 1 und Formel 2) in Abhängigkeit von dem Volumen m des Mittelstammes des ausscheidenden Bestandes.

Diese grundlegenden Zusammenhänge gelten auch heute noch für die motormannuelle Aufarbeitung. Auch der im Jahre 1979 als Nachfolger des *Holzernettarifs 1970* (HET)¹² eingeführte und heute – zwar nur noch zu geringen Anteilen für die Entlohnungsgrundlage für den Akkord der Regiearbeiter – immer noch für Holzerntekalkulationen verwendete *erweiterte Sortentarif* (EST) folgt dem von HILF (1929) erstmalig beschriebenen Stückmassegesetz (JACKE 2003).

¹² Der HET hat im Jahre 1970 den EHT abgelöst.

3.3.3 Produkt Rohholz

Rohholz ist „gefälltes, entwipfeltes und entastetes Holz, auch wenn es entrindet, abgelängt oder gespalten ist“ (NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN 1999, S. 5). Durch die Aufarbeitung des Baumholzes wird es in Form von Sortimenten in dem Volumen X [Fm o.R.] ausgehalten. Es setzt sich bedingt durch die Heterogenität des Objektes Laubbaum (vgl. Kapitel 3.3.1) aus (endlich vielen) n -Stücken mit den unterschiedlichen Stückvolumen x_i [Fm o.R.] zusammen (Formel 3).

$$X = \sum_{i=0}^n x_i \qquad \text{Formel 3}$$

mit

$$x_i = \pi * \left(\frac{d_i}{2}\right)^2 * l \qquad \text{Formel 4}$$

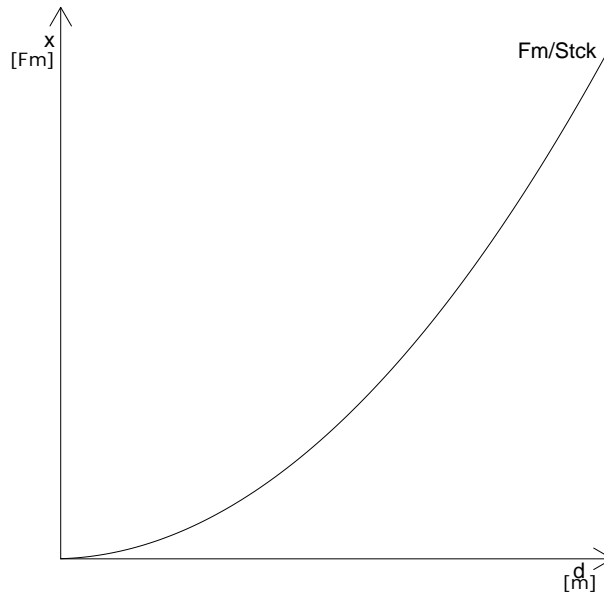


Abbildung 5: Produktionszusammenhänge zwischen Stückvolumen x und dem Mittendurchmesser d des jeweiligen Stückes.

Das jeweilige Stückvolumen vom Stamm oder von Stamm-/Astabschnitten lässt sich mit der HUBERschen Formel (KRAMER & AKCA 1987, S. 54) berechnen und setzt sich dabei aus dem Mittendurchmesser d des jeweiligen Stückes und seiner Stücklänge l zusammen (Formel 4). Abbildung 5 stellt das Stückvolumen in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser des Stückes dar. Hierbei wird deutlich, dass bedingt durch die Quadrierung des (halbierten) Mittendurchmessers und bei einer gleichbleibenden Stücklänge das Stückvolumen mit steigendem Mittendurchmesser progressiv ansteigt. Die steigenden Stückvolumen wiederum bedeuten, dass für die Bereitstellung eines Festmeters entsprechend weniger Stücke ausgehalten werden müssen.

Abbildung 6 zeigt den Verlauf der benötigten Stückzahlen in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser des Stückes für die Bereitstellung eines Festmeters Rohholz. Der Funktionsverlauf ist dabei regressiv fallend mit steigendem Mittendurchmesser.

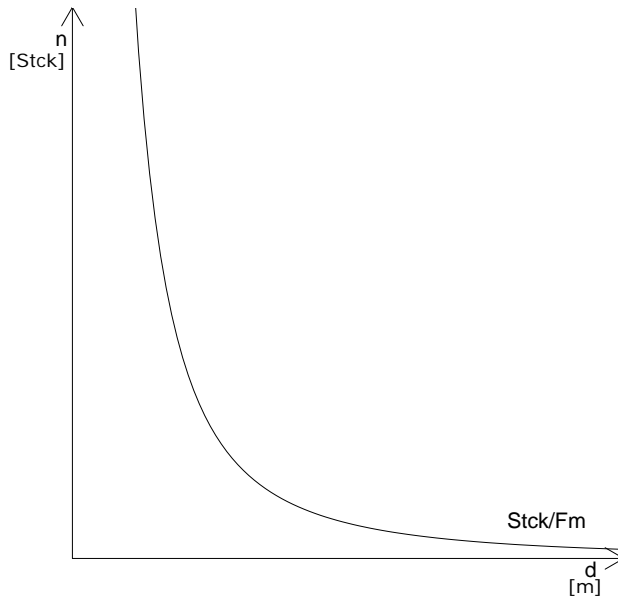


Abbildung 6: Produktionszusammenhänge zwischen den benötigten n -Stücken für die Bereitstellung eines Festmeters und dem Mittendurchmesser d des jeweiligen Stückes.

Die Aufarbeitungsrichtung verläuft i.d.R. vom Stammfuß ausgehend über die Krone in Richtung Knospen. Wird eine stetige Abholzigkeit unterstellt, so hat dies einen stetigen Rückgang der Astdurchmesser und bei gleicher Stücklänge auch der Stückvolumen zur Folge. Die produktionstheoretischen Zusammenhänge dieser abnehmenden Stückvolumen im Zuge der Aufarbeitung werden im folgenden Kapitel dargestellt.

3.3.4 Produktionstheoretische Zusammenhänge bei der Aufarbeitung von Baumkronen

Ziel der Produktionstheorie ist es, die „funktionalen Zusammenhänge zwischen der Menge der eingesetzten Produktionsfaktoren und der Menge der damit hergestellten Produkte (Ausbringungsmenge) aufzuzeigen“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 360). GUTENBERG (1983, S. 3) klassifizierte die zur Produktion eingesetzten Produktionsfaktoren (kurz: PF) in Elementarfaktoren und Dispositive Faktoren ein. Während letztere primär übergeordnete Faktoren wie Planung oder Leitung beinhalten und nach WÖHE & DÖRING (2000, S. 103) zum PF *Dispositive Arbeit* zusammengeführt werden können, fallen unter die Elementarfaktoren die drei direkt dem Produktionsprozess zuordenbaren PF *Ausführende Arbeit* (AA), *Betriebsmittel* (BM) und *Werkstoffe* (WS).

Durch den Einsatz der PF wird aus dem Objekt Baum mit seinem Baumholzvolumen das Produkt Rohholz hergestellt. Dabei haben bei der Aufarbeitung und Rückung eines Baumes alle vier oben genannten PF einen gewissen Einfluss. Beispielsweise kann die Planung des Einschlages oder die Erstellung der Sortimentsaushaltung durch den Revierleiter als Dispositive Arbeit angesehen werden. Auch die Arbeit im Forstamt durch bspw. die Sachbearbeitung Holz kann diesem PF zugeschlagen werden. Die direkte, objektbezogene Bearbeitung des Baumholzes (Fällung, Entasten und Einschnitt) hingegen wird durch den Verbrauch der drei direkt zuordenbaren PF umgesetzt. Im Falle der motormanuellen Ernte führt der Forstwirt die Arbeit (= PF Ausführende Arbeit) unter Zuhilfenahme seiner Motorsäge (= PF Betriebsmittel) aus. Der benötigte Motorsägensprit und -öle (Betriebsstoffe) sind zusammen dem PF Werkstoffe zuzuordnen. Die Rückung wiederum ist sowohl dem PF Ausführende Arbeit (Maschinenführer) als auch dem PF Betriebsmittel (Rückemaschine) und dem PF Werkstoffe (Diesel) zuzuordnen.

Die hier analysierte technische Produktion am Einzelbaum und damit auch die Grenzkostenanalyse beziehen sich nur auf die Ernte und Rückung des Produkts Rohholz. Der PF Dispositive Arbeit ist grundsätzlich für die gesamte forstliche Produktion (vgl. SPEIDEL 1983, S. 26ff) sehr wichtig, weist aber im Sinne der hier verwandten Definition der Produktion und somit im Bezug auf den Einzelbaum einen sehr geringen Gesamtverbrauch auf. In einem gewissen Rahmen steigt dieser Faktorverbrauch sogar auch bei Erhöhung der Anzahl der Produkte (Sortimente) bspw. durch das zusätzliche Aufmaß am Fahrweg, insofern hat dieser PF auch einen variablen Charakter. Andererseits besteht bei dem PF Dispositive Arbeit das Zuordnungsproblem des Faktorverbrauchs auf das Produkt. Insofern ist es im Rahmen dieser Analyse zielführend, den PF Dispositive Arbeit auszuklammern und das Augenmerk nur auf die direkt zuordenbaren PF zu legen. Folglich werden in den folgenden Ausführungen nur die drei direkt zuordenbaren PF analysiert.

Das Verhältnis von den eingesetzten PF (r_{AA}, r_{BM}, r_{WS})¹³ und der Menge der hergestellten Produkte (X) kann allgemein durch die dazugehörige Produktionsfunktion entsprechend Formel 5 beschrieben werden.

$$X = f(r_{AA}, r_{BM}, r_{WS}) \quad \text{Formel 5}$$

Charakteristisch für die motormanuelle Holzernte ist ein hoher personeller bzw. ein geringer maschineller Aufwand, während es bei der hochmechanisierten Ernte entsprechend andersherum ist. Aus produktionstheoretischer Sicht kann dies so gedeutet werden, dass das Verhältnis des Einsatzes des PF Ausführende Arbeit zu den beiden PF Betriebsmittel und Werkstoffe typisch für die jeweiligen Holzern-

¹³ Die Abkürzungen stehen für die Produktionsfaktoren Ausführende Arbeit (= AA), Betriebsmittel (= BM) und Werkstoffe (= WS).

teverfahren ist. Wird nun weiterhin unterstellt, dass sich das Verhältnis der PF für einzelne Holzernteverfahren unabhängig von der Produktionshöhe bzw. –intensität nicht ändert, so können diese PF auf Grund der feststehenden Proportionalität auch zusammengefasst werden. Als gemeinsame Verbrauchsgröße der zusammengesetzten PF (und damit der Arbeitsverfahren) bietet sich entsprechend der Planzeiten in der Arbeitswissenschaft der für den Produktionsumfang benötigte Zeitverbrauch [min] an. Entsprechend wird der zusammengesetzte PF als PF *Arbeitszeit* (r_{AZ}) definiert.

Bei Produktionsfunktionen und somit auch im Folgenden wird vereinfacht unterstellt, dass sowohl die Produktionsfaktoren als auch das Produkt beliebig teilbar (STEPAN & FISCHER 2009, S. 3) und homogen¹⁴ sind. Nichtsdestotrotz sei darauf hingewiesen, dass es sich bei dem Objekt Baum um Bäume mit ihren baumtypischen Eigenschaften wie bspw. vielfache Aufteilung des Stammes im Verlauf der Krone oder die vom Stammfuß zu den Knospen hin abnehmenden Astdurchmesser (vgl. Kapitel 3.3.1) handelt. Durch die Aufarbeitung entstehen Rohholzstücke, die bedingt durch den Wuchs des Baumes nicht einheitlich, sondern sehr unterschiedlich hinsichtlich Volumen, Form und Güte sind.

Diesen ungeachtet kann die Produktionsfunktion unter Berücksichtigung des PF *Arbeitszeit* (r_{AZ}) wie folgt beschrieben werden (Formel 6). Es handelt sich somit um ein einfaktorielles Produktionsmodell.

$$X = f(r_{AZ})$$

Formel 6

Zusammenfassend kann festgestellt werden: Im Zuge der Aufarbeitung eines Baumes wird die Menge X des Produkts Rohholz erstellt. Dabei sinken entsprechend der Aufarbeitungsrichtung die ausgehalten Stückvolumen durch die zunehmende Verzweigung bzw. den abnehmenden Astdurchmesser exponentiell (vgl. Abbildung 6). Zudem führen sinkende Stückvolumen hinsichtlich des Einsatzes des Produktionsfaktors *Arbeitszeit* (r_{AZ}) zu einem überproportionalen Zeitverbrauch je Volumeneinheit (vgl.

Abbildung 4).

Die Änderung des Outputs bei Änderung der Einsatzmengen aller Produktionsfaktoren wird mit Hilfe der Totalanalyse¹⁵ analysiert (WÖHE & DÖRING 2000, S. 369). Hierbei werden alle betrachteten Größen als variabel angesehen. Auf

¹⁴ Unter Homogenität ist zu verstehen, dass die Einheiten des Produktionsfaktors oder Produkts untereinander beliebig austauschbar sind (WÖHE & DÖRING 2000, S. 363). Unter Bezug auf die konkrete Entscheidungssituation bedeutet dies bspw., dass jede zusätzliche *Arbeitszeit* dieselben Kosten verursacht und jede Produktionseinheit (wie es bspw. bei Industrieholz gegeben ist) den gleichen Erlös je Volumeneinheit erzielt.

¹⁵ Auf Grund des einfaktoriellen Produktionsmodells unterscheidet sich die Partialanalyse nicht von der Totalanalyse.

Grund der oben genannten Produktionszusammenhänge ist bei der Aufarbeitung eines Baumes ein Produktionsfunktionsverlauf¹⁶ ähnlich einer neoklassischen Produktionsfunktion zu erwarten (Abbildung 7). „Die neoklassische Produktionsfunktion stellt den Teil der ertragsgesetzlichen Produktionsfunktion dar, in dem die Gesamtertragskurve degressiv steigend und die Grenzertragskurve fallend verläuft“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 404). Die Ertragskurve X steigt dabei durchgehend degressiv an. Die Produktion ist auf Grund der endlichen Verfügbarkeit des Holzvolumens am Baum begrenzt und kann somit maximal das gesamte Baumholzvolumen des Baumes umfassen. Entsprechend des degressiven Verlaufs der Ertragskurve verläuft die Grenzertragsfunktion X' durchgehend und leicht regressiv fallend, wobei sie sich der Abzisse annähert. Sie berechnet sich mathematisch aus der Ableitung der Ertragsfunktion zum PF Arbeitszeit (r_{az}) und stellt somit deren Steigung dar. Der regressive Verlauf der Grenzertragskurve zeigt an, dass die Ausweitung der Produktion mit einem überproportionalen Einsatz des Produktionsfaktors einhergeht. Die Grenzproduktivität des Produktionsfaktors Arbeitszeit sinkt folglich (WÖHE & DÖRING 2000).

¹⁶ Bei der dargestellten Funktion handelt es sich um ein Polynom dritten Grades. Die Darstellung ist dabei begrenzt auf den ersten Teilbereich (Nullpunkt bis zum Sattelpunkt) der Funktion, da auf Grund der Endlichkeit des Holzvolumens am Baum nach dem Erreichen des Sattelpunktes (= vollständige Aufarbeitung des Baumholzvolumens) kein zusätzliches Rohholz bereitgestellt werden kann.

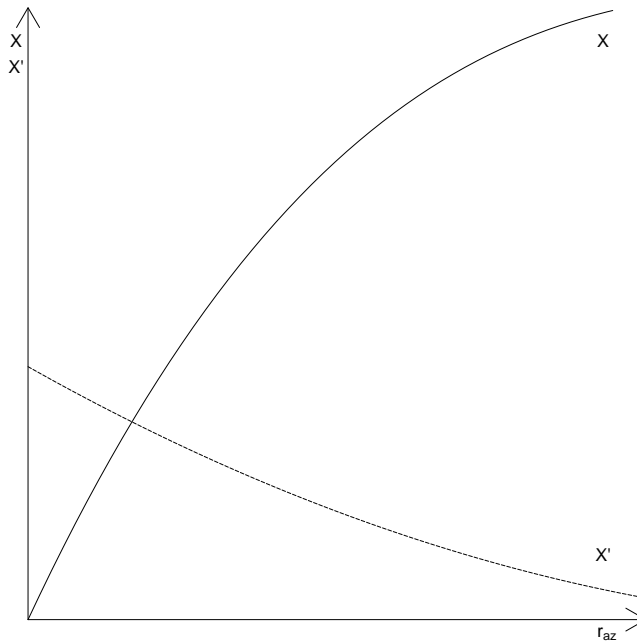


Abbildung 7: Verlauf der Produktionsfunktion X bzw. der Grenzertragsfunktion X' für die Aufarbeitung am Baum. Die Produktionsfunktion weist einen neoklassischen Verlauf auf.

3.4 Kostentheoretische Grundlagen der Rohholzbereitstellung am Einzelbaum

In der Kostentheorie werden die zur Produktion eingesetzten Produktionsfaktoren mit den Faktorpreisen monetär bewertet. „Das mit Hilfe der Produktionstheorie ermittelte Mengengerüst der Produktion wird von der Kostentheorie um ein Wertgerüst ergänzt“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 375). Sie zielt folglich darauf ab, „die funktionalen Beziehungen zwischen Ausbringungsmenge und den durch die Produktion entstandenen Kosten darzustellen“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 361). Während die Wertgröße für die Erstellung der betrieblichen Leistung die *Kosten* der eingesetzten Produktionsfaktoren sind, stellt der *Erlös* den anhand von Marktpreisen des Produktes monetär bewerteten Output dar. Die Differenz wiederum zwischen Erlös und Kosten ist der *Deckungsbeitrag*. Der gewinnmaximierende Entscheider zielt darauf ab, im Bezug zu der Aufarbeitung eines Baumes die Intensität mit dem höchsten Deckungsbeitrag und damit die *ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität* zu identifizieren.

Für die Bestimmung des Optimums wird die Kostenfunktion K aus dem Produkt der Faktoreinsatzmenge r und dessen Faktorpreis q gebildet (Formel 7).

Damit stellt die Faktoreinsatzmenge das Mengengerüst und der Preis das Wertgerüst dar.

$$K = f(q, r) = q * r \quad \text{Formel 7}$$

„Da die Faktoreinsatzmengen von der Ausbringungsmenge abhängen, gibt die Kostenfunktion gleichzeitig die Abhängigkeit der Kosten von der Ausbringungsmenge wieder“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 376). Die Kostenfunktion kann – ebenso wie die Erlösfunktion ($E = \text{Erlös}$, Formel 9) – auch als Funktion der Ausbringungsmenge X dargestellt werden (Formel 8).

$$K = f(X) \quad \text{Formel 8}$$

$$E = f(X) \quad \text{Formel 9}$$

„Den Zuwachs zu den Gesamtkosten, der durch die Produktion der jeweils letzten Ausbringungseinheit verursacht wird, bezeichnet man als *Grenzkosten*“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 392). Die Grenzkosten werden mathematisch – analog zur Grenzerlöskurve¹⁷ (Formel 11) – aus der Ableitung der Gesamtkostenkurve gebildet (Formel 10). Sie geben damit die Steigung der Gesamtkostenkurve wieder.

$$K' = \frac{\delta K}{\delta X} \quad \text{Formel 10}$$

$$E' = \frac{\delta E}{\delta X} \quad \text{Formel 11}$$

Grundsätzlich können Kosten selbst entsprechend ihres Verhaltens bei Produktionsänderung von fixer und variabler Natur sein. „Während fixe Kosten zeit- oder bereitchaftsabhängige Kosten sind, handelt es sich bei variablen Kosten um ausbringungsmengenabhängige Kosten“ (WÖHE & DÖRING 2000, S. 388). Wird eine Kostenfunktion bestehend aus fixen und variablen Kostenbestandteilen abgeleitet, so fallen die fixen Bestandteile weg. Die Entscheidungsgrundlage bei einer Grenzkostenbetrachtung sind somit nur noch die variablen Kosten.

Das Maximum des Deckungsbeitrages¹⁸ ist dann erreicht, wenn selbst eine Verminderung oder Erweiterung der Produktion keinen zusätzlichen Gewinnbeitrag leisten kann. Dies ist gleichbedeutend mit der Gleichheit der Grenzerlöse bzw. –kosten (Formel 12; Optimalitätsbedingung). Nur in diesem *ökonomischen*

¹⁷ In der wirtschaftswissenschaftlichen Literatur werden zum Teil Erträge bzw. Grenzerträge und Erlöse bzw. Grenzerlöse synonym verwendet. Im Rahmen dieser Untersuchung bezieht sich der Ertragsbegriff auf das Holzvolumen bzw. deren Änderung, der Erlösbegriff hingegen wird im Sinne dem Umsatzerlös aus dem Verkauf des aufgearbeiteten Holzes [EUR/Fm] (SPEIDEL 1983, S. 55) verwendet.

¹⁸ In dem Kapitel 5.1 wird als Berechnungsgröße der Erntekostenfreie Erlös (EKFE) eingebracht. Dieser ist gleichbedeutend mit dem hier erwähnten Deckungsbeitrag. Folglich gilt die Optimalitätsbedingung nach Formel 12 und Formel 13 für den EKFE ebenda.

Optimum ist der Grenzgewinn der zusätzlichen Einheit gleich Null und eine Änderung der Produktion erbringt keinen zusätzlichen Grenzgewinn (Formel 13). Wird ausgehend von dem ökonomischen Optimum bspw. die Produktion um eine Einheit gemindert, so dass die Grenzerlöse über den Grenzkosten liegen, so ist eine Ausweitung der Produktion auf Grund des Vorhandenseins eines positiven Grenzgewinnes ökonomisch vorteilhaft. Andererseits – wenn die Produktion ausgehend vom ökonomischen Optimum erweitert wird und damit die Grenzerlöskosten über den Grenzerlösen liegen – ist der Grenzgewinn negativ und eine Reduktion der Produktion ist ökonomisch vorteilhaft.

$$X_{\text{Gewinnmax}} \rightarrow \frac{\delta K}{\delta X} = \frac{\delta E}{\delta X} \quad \text{Formel 12}$$

$$\frac{\delta G}{\delta X} = \frac{\delta K}{\delta X} - \frac{\delta E}{\delta X} = 0 \quad \text{Formel 13}$$

Abbildung 8 stellt die oben aufgeführten Zusammenhänge grafisch dar. Während bei der Abbildung 8 (oben) die Kosten K auf Grund der regressiv fallenden Grenzerträge bei der Aufarbeitung am Baum (vgl. Abbildung 7) einen progressiven steigenden Verlauf annehmen, steigen die Erlöse E mit zunehmender Produktionsmenge linear an. Der Gewinn bzw. hier treffender der Deckungsbeitrag G als Differenz zwischen Kosten und Erlösen weist einen parabelförmigen Verlauf auf und hat sein Maximum an dem Punkt, an welchem die Steigungen der Kosten- und Erlösfunktionen gleich sind. Dieser Scheitelpunkt stellt folglich den Schnittpunkt der Grenzkosten K' bzw. Grenzerlöse E' dar (Abbildung 8 unten) und entsprechend schneidet bei dieser Produktionsmenge der Grenzgewinn G' die Abszissenachse. Somit ist dies die gewinnmaximale Produktionsmenge bzw. im Bezug zu der Aufarbeitung am Baum und mit dem Ziel der Gewinnmaximierung die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität.

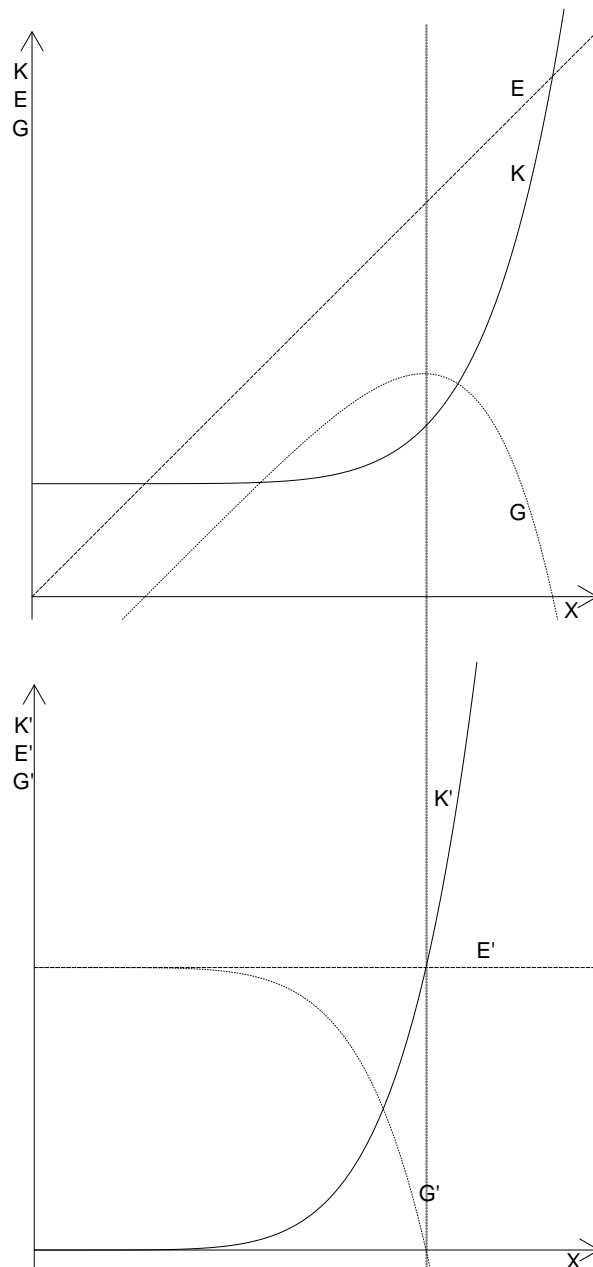


Abbildung 8: Theoretische, ökonomische Zusammenhänge für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Nutzungsmenge von einem Baum (X) anhand der Kosten-, Erlös- und Gewinnfunktionen (oben) und deren Grenzbetrachtung (unten).

Die in Abbildung 8 vorgestellten ökonomischen Zusammenhänge gelten für stetige Kosten-, Erlös und Gewinnfunktionen. Die Aufarbeitung eines Einzelbaumes und insbesondere hierbei die Kostenentstehung erfolgt jedoch in der Realität nicht in diskreter Form. Es werden bspw. an Verzweigungen (neben den Sortimentstrennschnitten) zusätzliche Trennschnitte durchgeführt und entsprechend entstehen dort zusätzliche Kosten, wohin gehend es zu dieser Kostenentstehung an verzweigungsfreien Bereichen (bspw. Stamm) nicht kommt. Insofern handelt es sich bei den oben skizzierten Zusammenhängen um ein eher abstraktes Modell für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Einzelbäumen. Welche Grundbedingungen für ein realitätsnäheres Modell gegeben sein müssen, wird im Kapitel 3.6 abgehandelt.

3.5 Grenzkosten in der betrieblichen Kostenrechnung

Der Kernbestandteil des betriebswirtschaftlichen Rechnungswesens ist die Kosten- und Leistungsrechnung, kurz *Kostenrechnung*. Sie ist Teil des internen Rechnungswesens und ihr Aufgabengebiet umfasst die zieladäquate Steuerung des innerbetrieblichen Faktorkombinationsprozesses (COENENBERG 1997, S. 23). Dazu gehört zum einen die Dokumentationsfunktion des Rechnungswesens als externe Aufgabe, zum anderen die Bereitstellung entscheidungsrelevanter Daten zu Planungs- und Kontrollzwecken als eine intern gerichtete Aufgabe der Kostenrechnung. Nach COENENBERG (1997, S. 37) erfolgt die Umsetzung der Kontrollaufgabe hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses durch einen Vergleich von Soll-Kosten¹⁹ und den angefallenen Ist-Kosten auf der Basis von Abweichungsanalysen und durch Zeitvergleiche. Die Kontrolle des betrieblichen Erfolgs hingegen wird anhand von verschiedenen Bezugsobjekten (Produkte, Kunden, Absatzgebiete) und vergleichsweise kurzen Zeiträumen aus der Differenz von Leistung abzgl. Kosten ermittelt.

Die innerbetrieblichen Aufgaben lassen sich funktional in die Teilbereiche Beschaffung, Produktion, Absatz sowie deren integrative Betrachtung einteilen. Die daraus ableitbaren *situationsbezogenen Rechnungen* (COENENBERG 1997, S. 37) zielen darauf ab, die Wirtschaftlichkeit des betrieblichen Handelns – wie bspw. im Produktionsbereich durch die Bereitstellung von „Informationen über die effizientesten Produktionsmöglichkeiten und damit über die Wahl der optimalen Produktionsverfahren sowie optimaler Los- bzw. Seriengrößen und Fertigungsreihenfolgen“ (COENENBERG 1997, S. 37) – zu fördern. Die übergeordneten, alle Funktionsbereiche umfassenden integrativen Rechnungen dienen hingegen „der Fundierung von Entscheidungen im Zusammenhang mit der Optimierung der Produkti-

¹⁹ Soll-Kosten werden aus den Plan-Kosten abgeleitet (COENENBERG 1997, S. 37).

onstiefe und der Kapazitätsplanung im Unternehmen“ (COENENBERG 1997, S. 37).

Grundlage aller Kalkulationen sind *Leistungen* und *Kosten*, welche sich als bewertete/r sachzielbezogene/r Gütererstellung bzw. Güterverbrauch definieren lassen (COENENBERG 1997, S. 40). Sie beziehen sich nur auf den betrieblichen Leistungserstellungsprozess. Im Vergleich zur (externen) Gewinn- und Verlustrechnung, bei welcher Ertrag und Aufwand die zentralen Erfolgsgrößen sind, werden bei der (internen) Kostenrechnung keine betriebsfremden Erfolgskomponenten sowie periodenfremde und außerordentliche Erträge bzw. Aufwendungen erfasst. Auch ist die Kostenrechnung eine gesetzlich freie, betriebswirtschaftlichen Grundsätzen folgende Rechnung, welche von dem Realisations- und Anschaffungswertprinzip (der Gewinn- und Verlustrechnung) abweichen kann (COENENBERG 1997, S. 40).

Die Kostenrechnungssysteme gliedern sich in die Kostenarten-, Kostenstellen- und Kostenträgerrechnung, welche die wesentlichen Ansatzpunkte und Auswertungsstufen des innerbetrieblichen Rechnungswesens darstellen. Ein wichtiger Gesichtspunkt bei der Kostenrechnung ist die richtige Zurechnung der Kosten. Es werden dabei zwei verschiedene *Zurechnungsprinzipien* unterschieden: das Verursachungsprinzip und das Durchschnittsprinzip (COENENBERG 1997, S. 47). Bei dem *Verursachungsprinzip* werden die Kosten entsprechend ihrer Entstehung bei der Bereitstellung der betrieblichen Leistung direkt auf der Kostenstelle, dem Kostenträger und der Periode zugerechnet. Das *Durchschnittsprinzip* hingegen erlaubt eine nicht verursachungsgerechte Zurechnung, da verschiedene Kosten (bspw. Verwaltungskosten) nicht bzw. nur schwerlich unmittelbar direkt zugeordnet werden können. Entsprechende Kosten werden daher proportional auf die Grundgesamtheit umgelegt.

Die Kostenrechnung erlaubt es die Kosten hinsichtlich verschiedener Kriterien zu klassifizieren. Eine mögliche und für diese Arbeit wichtige Klassifizierung erfolgt nach dem Verhalten der Kosten bei der Variation eines Einflussfaktors. Ein hierbei häufig genutztes Beispiel ist die Veränderung der Kosten bei Variation der Produktionsmenge in einem Unternehmen. In diesem Zusammenhang sind *Fixkosten* solche, welche unabhängig von der Produktionsmenge „in konstanter Höhe anfallen und lediglich kapazitätsabhängig oder zeitproportional sind und für die Aufrechterhaltung von Betriebs- und Leistungsbereitschaft entstehen“ (COENENBERG 1997, S. 52). *Variable Kosten* hingegen zeichnen sich dadurch aus, dass sie abhängig von der Produktionsmenge sind und sich proportional mit dieser verändern. Zudem können sie auch in dem Grad und der Intensität der Abhängigkeit variieren. Sie werden aus diesem Grund auch *proportionale Kosten* oder *Grenzkosten* bzw. in der amerikanischen Bezeichnung „direct costs“ genannt (RIEDEL 1978, S. 18). Die Klassifikation der Kosten in Einzel- und Gemeinkosten ist dabei von der oben gewählten zu unterscheiden (vgl. COENENBERG 1997, S. 53f).

Das älteste und einfachste Kostenrechnungssystem ist die Vollkostenrechnung (RIEDEL 1978, S. 11). Hierbei werden alle Kosten der Abrechnungsperiode – sowohl fixer als auch variabler Natur – auf die erzeugten Leistungen verteilt. Die Teilkostenrechnung hingegen vernachlässigt die Fixkosten und basiert nur auf den variablen Kosten. Entsprechend wird hierbei auch von der *Grenzkostenrechnung* gesprochen. Nach BRABÄNDER (1994, S. 96) bleibt „die eigentliche Domäne der Teilkostenkonzeption ... ihre Funktion als Entscheidungshilfe in kurzfristigen Überlegungen. Für diesen Zweck wird die Deckungsbeitragsrechnung in der Forstwirtschaft seit langem mit großem Erfolg verwendet“. Bei der Deckungsbeitragsrechnung handelt es sich um eine Sammelbezeichnung von Bruttoerfolgsrechnungen, welche auf der Trennung zwischen fixen und variablen Kosten beruhen. Der Deckungsbeitrag (kurz: DB) umfasst bei der stufenweisen Fixkostendeckungsbeitragsrechnung mehrere Berechnungsebenen und wird im ersten Schritt aus der Differenz zwischen den Erlösen (= Leistung) je Produktionseinheit und den dazugehörigen Grenzkosten gebildet (SPRINGER GABLER VERLAG 2013b). Erst in der Folge kommt es zur Verrechnung der Fixkosten, welche „schichtweise“ auf die Produktionseinheit selbst in Form vom den zugehörigen Produktgruppen bzw. Bereichs- und Unternehmensfixkosten aufgeschlagen werden. Je nach Zurechnungsweise der fixen Kosten wird zwischen einfacher Deckungsbeitragsrechnung (direct costing) und mehrstufiger Deckungsbeitragsrechnung unterschieden (SPRINGER GABLER VERLAG 2013a).

Bei dem im Kapitel 0 vorgestellten Entscheidungsmodell wird eine einfache Deckungsbeitragsrechnung – bestehend aus der Differenz zwischen dem Erlös je Volumeneinheit und den direkt zuordenbaren Kosten je Volumeneinheit für die Holzernte und Holzrückung – ohne Verrechnung der fixen Kostenbestandteile durchgeführt.

3.6 Grundbedingungen für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen

Für die Durchführung einer Grenzkostenanalyse zur Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitung von Bäumen sind die zwei folgenden Bedingungen grundlegend.

1. *Genauigkeit der Kostenrechnung*: Die (Grenz-)Kosten und (Grenz-)Erlöse müssen zu jeder Zeit im Produktionsprozess verursachungsgerecht dem naturalen Produktionsmodell zuordenbar sein und sich proportional bei Änderung der Einflussgrößen ändern (vgl. WÖHE & DÖRING 2000, S. 1124).
2. *Effiziente Optimierungsalgorithmen*: Die Optimierungsalgorithmen müssen unter variierenden Rahmenbedingungen alle potentiellen Nutzungspfade

und Kombinationen von diesen durchgehend von einem manuell festzulegenden Startpunkt bis zu einem Endpunkt hinsichtlich derer ökonomischer Vorteilhaftigkeit überprüfen und diejenige Aufarbeitungsintensität mit dem größten Zielbeitrag identifizieren.

In Anbetracht des methodischen Ansatzes einer Grenzkostenanalyse und der heterogenen Produktionsgrundlage wie die eines Laubbaumes (vgl. Kapitel 3.3.1) bestehen äußerst hohe Ansprüche an die *Genauigkeit der Kostenrechnung*. Die besondere Schwierigkeit liegt darin begründet, dass jeder der drei Grundbausteine der Grenzkostenanalyse – das naturale Produktionsmodell, die Kosten bzw. die Erlöse – eine sehr hohe Güte aufweisen muss und die drei Grundbausteine optimal aufeinander abgestimmt sein müssen. Der Grundbaustein mit der geringsten Detailtiefe bestimmt maßgeblich die Aussagefähigkeit der Analyseergebnisse. Tabelle 1 gibt eine kurze Übersicht über die wichtigsten Anforderungen der drei Grundbausteine.

Tabelle 1. Übersicht über die Anforderungen einer Grenzkostenanalyse bei der Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Einzelbäumen.

Detaillierte Kenntnisse der...	
Produktionsmodell	- baumartentypischen Kronenmorphologie - Astdurchmesser und –längen in der Krone - Verzweigungshäufigkeiten - Abholzigkeit (insbesondere nach Verzweigungen)
Kosten	- verursachungsgerechte Kostenzuordnung auf den Kostenträger - Kostenentstehung innerhalb der Aufarbeitungsprozesse
Erlöse	- Güte, Längen- bzw. Durchmesserdimension (Holzvolumen) der auszuhaltenden Kronenstücke

Hinsichtlich des naturalen Produktionsmodells sind für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität besonders die Kenntnisse über die baumartentypische Morphologie relevant. Hierzu zählt neben detaillierten Kenntnissen der Stammform bzw. deren Abholzigkeit insbesondere die Gewissheit über die baumartentypische Kronenmorphologie (z. B. Astlängen bzw. -durchmesser, Verzweigungshäufigkeiten bzw. -stärken, Abholzigkeit). Bisherige in der Literatur bekannte Einzelbaummodelle verwenden zumeist integrierte Schaftformfunktionen, um die Verteilung des Baumholzes am Baum darzustellen (KUBLIN 2003, S. 185f; BONT 2005, S. 22f; NAGEL 2009, S. 20f; FVA FREIBURG 2002, S. 4). Diese Schaftformfunktionen haben dabei vornehmlich zum Ziel, den Baumschaft und damit das Stammholz abzubilden. Grundsätzlich ermöglichen die

Schaftformfunktionen den Einsatz sehr effizienter Optimierungsalgorithmen zur Abschätzung des Sortimentanfalls unter Einbindung diverser Restriktionen (BONT 2005, S. 2; PUUMALAINEN 1998). Sie verlieren jedoch insbesondere beim Laubholz mit Beginn der Krone und damit durch die Aufteilung des (einen) Schaftes in mehrere kleinere Schäfte einen Großteil ihrer Präzision (KRAMER & AKÇA 1987, S. 53), denn die baumartenspezifische Kronenmorphologie wird hier nur dadurch berücksichtigt, dass die Schaftformen mit Beginn des Kronenansatzes eine veränderte Bauchigkeit aufweist. Für die verursachungsgerechte Zuordnung der Erntekosten auf die Verzweigungsstellen oder die – insbesondere bei der motormanuellen Holzernte bekannte (vgl. Kapitel 3.3.2) – Abhängigkeit der Aufarbeitungskosten von den Astdurchmessern sind jedoch detaillierte Kenntnisse der Kronenmorphologie zwingend erforderlich. Weiterhin sollte eine ökonomisch optimale Aufarbeitung in variablen Erlös-Kosten-Verhältnissen auch Aussagen über die ökonomische Vorteilhaftigkeit der Aufarbeitung von Reisig erlauben.

Um die Produktionskosten einem detaillierten Produktionsmodell zuordnen zu können, bedarf es entsprechend dezidierter Informationen hinsichtlich der Kostenentstehung. Der Verbrauch der relevanten Produktionsfaktoren muss entsprechend verursachungsgerecht auf den Kostenträger zugerechnet werden können, sodass Fehlzusordnungen vermieden werden. Durchschnittskosten bilden die Kostenentstehung nur bedingt ab. Hierbei sei darauf hingewiesen, dass ein Großteil der in der Literatur bekannten Kalkulationsgrundlagen auf Durchschnittskostensätzen basiert und somit für eine Grenzkostenanalyse nicht brauchbar sind (AFL 2012, S. 172ff; FVA FREIBURG 2002, S. 49; MÖHRING 1997, S. 68). Die verursachungsgerechte Kostenzuordnung auf einen bestimmten Kostenträger ist nur möglich, wenn die Aufarbeitungsprozesse hinsichtlich des Produktionsfaktorverbrauchs detailliert analysiert bzw. ausgewertet werden und die Erkenntnisse daraus in das Produktionsmodell integriert werden können.

Die Anforderungen an die Differenzierung der Erlösberechnung sind in dieser Arbeit vergleichsweise gering. Bestimmungsfaktoren für die Höhe der Holzerlöse sind grundsätzlich die Holzgüte, die Stärkeklasse und das Volumen der auszuhaltenden Stücke, wobei die ersten beiden Bestimmungsfaktoren im Wesentlichen den Holzerlös bestimmen. Da vor der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsgrenze am Baum bzw. Ast in der Regel nur Holz geringer Güte (wie bspw. Brennholz oder Industrieholz) anfällt, können die Modellannahmen für die Anforderungen an die Erlösberechnung heruntergesetzt werden. Insbesondere bei der Baumart Buche sind die Erlöse je Volumeneinheit bei den geringwertigen Sortimenten sehr einheitlich, sodass trotz unterschiedlicher Sortimentierung bzw. Verwendung der ausgehaltenen Kronenstücke auch ein einheitlicher Erlös je Volumeneinheit adäquat erscheint. Durch diese Vorgehensweise kann insbesondere auf die Einbindung der für die Forstwirtschaft typischen Koppelproduktion verzichtet werden, sodass auch eine Berücksichtigung von unterschiedlichen Aushaltungsbedingungen (Mindestlängen, Mindestzopf, Güte o.ä.) entfällt. Diese Zusammenhänge

sind grundsätzlich nicht über stetige Funktionen beschreibbar und benötigen daher zum Lösen eines Entscheidungsproblems entsprechend komplexe Rechenalgorithmen, auf die durch die Reduktion auf einen einheitlichen Erlös je Volumeneinheit verzichtet werden kann.

Die zweite Grundbedingung für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität betrifft im Wesentlichen das Vorhandensein von *effizienten Optimierungsalgorithmen* und wird im Folgenden anhand der Abbildung 9 visualisiert, welche beispielhaft die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität einer liegenden Krone bei einem mehrdimensionalen Entscheidungsproblem darstellt und sowohl Elemente des Entscheidungsbaumverfahrens (vgl. SPRINGER GABLER VERLAG 2014a), der Netzplantechnik (vgl. WÖHE & DÖRING 2000, S. 169f) und der dynamischen Programmierung (vgl. STEPAN & FISCHER 2009, S. 279f) enthält. Es handelt sich somit um eine Hybrid-Darstellung aus einer möglichen Kronenform und ökonomischen Elementen. Grundsätzlich kann die Aufarbeitung in der Krone als ein mehrstufiger Arbeitsprozess angesehen werden, bei dem mit jedem Sortiments-/Asttrennschnitt ein neuer Arbeitsschritt zur Aufarbeitung des Folgesortimentes anfängt. In dem Beispiel in Abbildung 9 verästelt sich die Krone ausgehend von dem Kronenansatz (= Arbeitsschritt Startpunkt; links) in drei Hauptäste, welche sich anschließend in unterschiedlicher Häufigkeit (maximal zweifach) zusätzlich verzweigen. Der Entscheider muss nun unter Zuhilfenahme ökonomischer Informationen diejenige Aufarbeitungsintensität (und damit die notwendigen Aufarbeitungsschritte) bestimmen, welche unter den aktuellen Verhältnissen ökonomisch optimal ist.

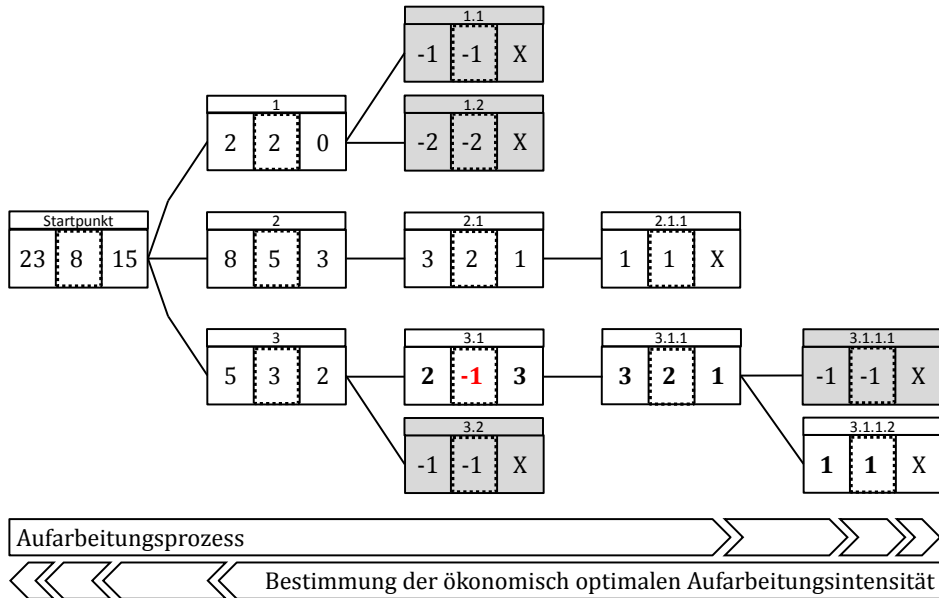


Abbildung 9: Problematik der Kronenverzweigung und darauf aufbauenden Entscheidungsfindung zur Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität anhand eines ökonomischen Optimierungsalgorithmus.

Zur Darstellung des Entscheidungsprozesses sieht die Grundstruktur in der Abbildung 9 (vgl. Legende Anhang 1) vor, dass die Deckungsbeiträge sowohl für jeden einzelnen Aufarbeitungsschritt (mittleres Kästchen) als auch kumuliert in entgegengesetzter (rekursiver) Aufarbeitungsrichtung ohne (rechtes Kästchen) bzw. mit (linkes Kästchen) dem Deckungsbeitrag des aktuellen Aufarbeitungsschrittes dargestellt werden. Aufarbeitungsschritte (kurz: AS) mit negativen Deckungsbeiträgen werden nur dann mit den positiven Deckungsbeiträgen kumuliert, soweit sie Teil der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität sind (graue Kästchen). Jeder AS ist durch eine Zahlenabfolge gekennzeichnet, wobei die Länge der Zahlenabfolge die Aufarbeitungstiefe und die Höhe der einzelnen Zahlen die Aufarbeitungsalternative ausgehend vom vorherigen AS angibt.

Während der tatsächliche Aufarbeitungsprozess von dem Kronenansatz in die Richtung der Terminalknospe verläuft, erfolgt die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität auf Grund der diskreten Kostenfunktion in einem rekursiven Prozess von der Terminalknospe ausgehend zum Kronenansatz und damit entsprechend der dynamischen Programmierung (Rekursion) bzw. dem Entscheidungsbaumverfahren (Roll-Back-Verfahren). Der Grund für diese Vorgehensweise wird in dem AS 3.1 deutlich, welcher einen negativen Deckungsbeitrag (-1 Geldeinheit; rot hervorgehoben) erbringt und nichtsdestotrotz Teil der optimalen Lösung ist. Der negative Deckungsbeitrag kann auf Grund des einheit-

lichen Erlöses je Volumeneinheit (s.o.) nicht auf einer Erlösänderung basieren, sondern er ist auf die „sprunghaft“ angestiegenen Aufarbeitungskosten²⁰ durch bspw. erhöhten Sägearbeit in diesem AS zurückzuführen. Die auf den AS 3.1 anschließenden AS 3.1.1 und 3.1.1.2 erbringen in Summe einen positiven Deckungsbeitrag von drei Geldeinheiten (GE) (rechtes Kästchen bei AS 3.1), welcher den negativen Deckungsbeitrag der Aufarbeitung von AS 3.1 überschreitet und somit ihn Teil der ökonomisch optimalen Lösung werden lässt²¹. Der ebenfalls an diesem Ast potentiell anfallende AS 3.1.1.1 erbringt keinen Deckungsbeitrag. Da sich jedoch an diesen AS keine weiteren positiven AS anschließen, endet die Aufarbeitung vor diesem AS, wodurch dieser AS nicht Teil der optimalen Lösung (grau hinterlegt) wird. Der kumulierte Deckungsbeitrag der auf AS 3.1.1 nachfolgenden Aufarbeitungsschritte (1; rechtes Kästchen) berechnet sich folglich nur aus dem Deckungsbeitrag des AS 3.1.1.2, nicht aber der des AS 3.1.1.1.

Der maximale Deckungsbeitrag bzw. die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität berechnet sich ebenfalls aus der rekursiven Betrachtungsweise heraus aus der Deckungsbeitragssumme aller AS mit positiven Aufarbeitungsentscheidungen und findet sich im linken Kästchen vom AS Startpunkt (=Kronenansatz) wieder. Die vom Kronenansatz ausgehenden Hauptäste (= AS 1, 2 und 3) erbringen dabei einen unterschiedlichen Zielbeitrag (linkes Kästchen des jeweiligen AS), stellen aber für jeden Hauptast den maximalen Deckungsbeitrag dar. Die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität berechnet sich somit entsprechend der dynamischen Programmierung bzw. dem Optimalitätsprinzip nach Bellman (vgl. STEPAN & FISCHER 2009, S. 279f) aus ökonomisch optimalen Teillösungen.

Diese Darstellungsweise zeigt somit auf leicht verständliche Art und Weise, dass die Entscheidung über die ökonomische Vorteilhaftigkeit der Aufarbeitung von AS mit negativem Deckungsbeitrag nicht in der Richtung des Aufarbeitungsprozesses zu treffen ist, sondern dass sich die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität nur in einem rekursiven Prozess (von der Terminalknope ausgehend) bestimmen lässt. Entsprechend muss ein Optimierungsalgorithmus für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität in einem rekursiven Rechenprozess arbeiten, um die diskrete Kostenfunktion verarbeiten zu können. Grundlegend für die Vorgehensweise sind vollständige Informationen (deterministische Entscheidung) über die Deckungsbeiträge der folgenden AS, wie sie bei der Aufarbeitung von Kronen auf Grund der direkt sichtbaren Kronenmorphologie anzunehmen ist.

²⁰ Aus diesem Beispiel wird wiederum der diskrete Verlauf der Kostenfunktion deutlich.

²¹ Grundbedingung bei dieser Betrachtungsweise ist es, dass keine Arbeitsschritte übersprungen werden können.

4 Prozesskostenanalyse für die hochmechanisierte Buchenkronenaufarbeitung

4.1 Einführung und Ziel der Studie

Der Einsatz von hochmechanisierten Erntesystemen in der Laubholzernte wurde in der Vergangenheit vornehmlich auf schwächere BHD-Bereiche beschränkt (vgl. PAUSCH 2007, S. 746; SCHORR 2000, S. 522; GUGLHÖR 1994, S. 698). Die Gründe hierfür liegen u.a. der starken Verzweigung in der Laubholzkrone. Bedingt durch die Weiterentwicklung der Harvestertechnologie bspw. in den Bereichen des Aggregat-Handlings, der Durchzugsgeschwindigkeit sowie der Aggregat- und Kranleistung kommt es jedoch zu einem zunehmenden Einsatz in der Laubholzaufarbeitung.

Das Problem aus Sicht dieser Studie besteht bei denen in der Literatur zu findenden Kostensätzen für die hochmechanisierte Buchenkronenaufarbeitung darin, dass es sich bei der Bezugsgröße vorwiegend um das durchschnittliche (Baum-) Stückvolumen des ausscheidenden Bestandes handelt. Bereits GUGLHÖR (1994, S. 697) und SCHORR (2000, S. 522) heben die Bedeutung der Verzweigung in den Laubholzkronen für die Höhe der Aufarbeitungskosten hervor und zeigten für die Laubschwachholzernte detailliert die Methoden bzw. Prozesse der Entastung mit Hilfe des Harvesteraggregates auf. Dabei können für verschiedene Kronenverzweigungstypen unterschiedliche baumbezogene Aufarbeitungszeiten nachgewiesen werden. Eine Quantifizierung der einzelnen (Teil-)Prozessgrößen gelang hingegen nicht, sodass auch die wichtigen Erkenntnisse von GUGLHÖR (1994) und SCHORR (2000) für eine Grenzkostenanalyse nur bedingt hilfreich sind.

Für eine, auf einer Grenzkostenanalyse basierenden, ökonomischen Bewertung reichen bekanntlich Durchschnittsgrößen nicht aus (vgl. Kapitel 3.6). Stattdessen müssen sehr detaillierte Informationen für die einzelnen (Teil-) Prozesse

bezüglich der Kostenentstehung, der Kostengrößen und deren Abhängigkeiten bekannt sein. Während bei der hochmechanisierten Aufarbeitung von Nadelhölzern eine Auswertung der (auf dem On-Board-Computer gespeicherten) aufgearbeiteten Stückzahlen, deren Holzvolumen und zugehörigen Zeitverbräuchen eine valide Datenbasis für mögliche Grenzkostenanalysen bilden könnte, ist dieses im Laubholz auf Grund von technischen Erfassungsproblemen²² nicht möglich und somit scheiden diese Datensätze als Datenbasis für eine durchzuführende Grenzkostenanalyse aus.

Die Durchführung der Prozesskostenanalyse hat daher zum Ziel, die notwendigen Grundlagen für eine ökonomische Bewertung der hochmechanisierten Buchenernte – welche dem Grenzkostenansatz gerecht wird – zu schaffen. Dazu zählt die baum- bzw. stückbezogene Beschreibung und Abgrenzung der Aufarbeitungs(teil)prozesse sowie die Identifizierung und Quantifizierung der Kostentreiber bei der Aufarbeitung der Buchenkrone.

Im Rahmen dieser Prozesskostenanalyse wurden unter Betreuung des Autors zwei Bachelorarbeiten (ROSE 2013; NEUGEBAUER 2013) verfasst, deren Studienergebnisse in die folgenden Unterkapitel einfließen.

4.2 Material und Methodik

4.2.1 Personelle und technische Ausstattung

Der Maschinenstützpunkt Seesen der Niedersächsischen Landesforsten stellte sowohl die Maschinenführer als auch den Harvester für die Studie bereit. Die beiden Maschinenführer arbeiten seit mehr als 15 Jahren in der hochmechanisierten Holzernte und arbeiten häufig in Laubholzbeständen, so dass die an sie gestellten Forderungen keine außergewöhnlichen Anforderungen darstellen. Nach Aussage des Maschineneinsatzleiters (BIENECK 2013a) sind die beiden Maschinenführer sehr leistungsfähig und in Bezug auf ihre Arbeitsweise bzw. -leistung vergleichbar.

Bei der Maschine handelte es sich um einen Harvester vom Typ John Deere 1270E IT4, welcher mit dem 10 m langen Kran CH7 und dem Starkholzaggregat Waratah H480C bestückt ist. Der Harvester wird mit 170 kW nach der Klassifizierung des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik (FORBRIG 2000, S. 98) zu den großen Harvestern gezählt.

²² Durch zusätzliche Trennschnitte in Folge der vergleichsweise starken Kronenverzweigung, ungenauer Längenmessung durch bögige Kronenäste und weiterhin durch im Aggregat befindliches Feinreisig bei der Astdurchmessermessung sind die sog. Harvesterprotokolle im Laubholz stark fehlerbelastet (vgl. NEUGEBAUER 2013).

Zur Videoaufnahme wurde eine GoPro Hero 2 HD im Dauerbetrieb verwendet. Die Auswertung des Videomaterials erfolgte mit der Software Avidemux, für die Datenbankoperationen, Datenanalysen bzw. -darstellungen wurde auf das Statistikpaket R für Windows 3.0.2 32bit (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2013) zurückgegriffen.

4.2.2 Untersuchungsflächen und Datenerfassung

Die beiden, dem Naturraum Niedersächsisches Bergland zuzuordnenden Untersuchungsbestände liegen in der Revierförsterei Mollenfelde des Niedersächsischen Forstamtes Münden (Abt. 3221a2 und Abt. 3240b1) und zeichnen sich zwar durch unterschiedliche Altersklassen (64 bzw. 96 Jahre), aber insgesamt sehr ähnliche und damit vergleichbare Bestandessituationen aus. Bei beiden in Summe 40,6 ha umfassenden Beständen handelt es sich um Buchen-Edellaubholz-Bestandestypen mit einem Buchenanteil von rd. 80 % und nur geringer Naturverjüngung. Die standörtliche Ausstattung ist in dem nur schwach geneigten Gelände mit mäßig frischen bis kaum frischen Kalksteinverwitterungslehmböden sehr gut und ermöglicht eine hohe Wüchsigkeit (Buche mit Leistungsklasse 9). Die Qualität des ausscheidenden Bestandes kann insgesamt als durchschnittlich bezeichnet werden (NLF 2013).

In den beiden Flächen wurde durch den Revierleiter im Zuge der Bestandesvorbereitung der ausscheidende Bestand markiert, von dem für die Prozesskostenanalyse eine zufällige Stichprobe von 407 Buchen gezogen wurde (Tabelle 2). Die Durchführung der Prozesskostenanalyse sah vor, den Arbeitsablauf mit Hilfe einer in der Harvesterkabine installierten Videokamera (GoPro Hero 2 HD) ununterbrochen zu filmen und anschließend das Videomaterial am Arbeitsplatz hinsichtlich der Prozessabläufe und der Zeitverbräuche einzelner Prozessteilabschnitte auszuwerten. Um die Zeitverbräuche den Einzelbaumdimensionen zuordnen zu können, musste jeder Baum im Video eindeutig identifizierbar sein. Aus diesem Grund wurden die Bäume vor der Ernte von drei Seiten mit einer Identifikationsnummer besprüht, welche von der Harvesterkabine aus bzw. im Video lesbar war, und an den Stichprobenbäumen in beiden Beständen eine einzelbaumweise Stehendaufnahme durchgeführt. Die Stehendaufnahme wurde in Papierform dokumentiert und erfasste je Einzelbaum folgende Faktoren: den BHD (durch kreuzweises Kluppen), die Höhe des Kronenansatzes, des Zwiesels und der Kronenspitze (gemessen mit dem Forestor-Vertex IV/M von Haglöf) sowie den Kronentyp nach HENGST (1964, S. 79f) (siehe Anhang 2). Die bereits in Kapitel 2.1 (siehe Abbildung 1) vorgestellten Kronentypen boten sich hierfür besonders an, da sie eine zügige Ansprache der Krone auch im belaubten Zustand erlaubten.

Tabelle 2: Beschreibende Statistik der Untersuchungsobjekte (n=407) in den Versuchsbeständen Abt. 3221a2 und Abt. 3240b1 der Revierförsterei Mollenfelde im Niedersächsischen Forstamt Münden.

	Min	Median	Mean	Max
BHD [cm]	19,3	33,7	33,9	51,4
Oberhöhe [m]	23,1	26,7	26,8	31,2
Kronenansatzhöhe [m]	1,7	10,6	10,9	21,6
Zwieselhöhe [m]	5,4	14,7	16,5	30,1

	Zwiesel- förmig	Besen- förmig	Wipfel- schäftig
Kronentyp	168	177	62

Die Videokamera wurde an der Frontscheibe der Fahrerkabine und damit direkt über dem Fahrer installiert. Durch das Weitwinkelobjektiv der Kamera waren Aufnahmen in hoher Tiefenschärfe in einem 170° Winkel möglich, sodass in Kombination mit der mitdrehenden Fahrerkabine der gesamte, i.d.R. frontal vor der Fahrerkabine ablaufende Aufarbeitungsprozess in High-Definition-Qualität gefilmt werden konnte. Durch die am Harvester installierten Scheinwerfer waren zudem Aufnahmen zu jeder Tag- und Nachtzeit möglich. Auf Grund des hohen Datenvolumens der Videoaufnahmen mussten alle fünf Stunden die SD-Speicherkarten an der Kamera gewechselt werden. Diese Aufgabe übernahmen wie auch das An-/Abschalten der Videoaufnahme und das Ansagen der Baumidentifikationsnummern die Maschinenführer selbstständig.

Zusätzlich wurden in einer Unterstichprobe (n=101, Tabelle 3) die aufgearbeiteten Sortimenten (n=744) hinsichtlich ihrer Herkunft (Stamm-/Kronenbereich) protokolliert, in ihren Dimensionen (Länge, Mittendurchmesser, Zopfdurchmesser) vermessen (Tabelle 4) sowie in ihrer Formigkeit qualitativ erfasst (siehe Anhang 3). Um den Sortimenten in der anschließenden Auswertung eindeutig die Zeitverbräuche zuordnen zu können, wurden diese bei der Aufarbeitung vom Maschinenführer direkt am nummerierten Erdstammstück bzw. dort in einzelbaumweisen Poltern abgelegt. Anhand der Videoaufnahmen (= Videobeweis) wurde die Aufarbeitungsreihenfolge im Schlag festgestellt und im Zuge der Liegendaufnahme jedem Sortiment eine eindeutige Identifikationsnummer bestehend aus Baumnummer und Nummer der Sortimentsreihenfolge am Baum zugeordnet (Anhang 4). Diese eindeutige Zuweisung ermöglichte im Nachhinein den gesamten Prozessablauf der Aufarbeitung der Buchenkronen zu rekonstruieren und die

verschiedenen Datensätze im Rahmen der statistischen Analyse miteinander zu verschneiden.

Tabelle 3: Beschreibende Statistik der Unterstichprobe (n=101) in den Versuchsbeständen Abt. 3221a2 und Abt. 3240b1 der Revierförsterei Mollenfelde im Niedersächsischen Forstamt Münden.

	Min	Median	Mean	Max
BHD [cm]	19,8	34,1	33,7	45,7
Oberhöhe [m]	23,2	26,8	26,7	29,7
Kronenansatzhöhe [m]	5,1	10,6	10,8	16,1
Zwieselhöhe [m]	7,1	15,3	17,1	28,6

	Zwiesel- förmig	Besen- förmig	Wipfel- schäftig
Kronentyp	36	49	16

Tabelle 4: Beschreibende Statistik der ausgehaltenen Kronen- (n=466) und Stammsortimente (n=278) der Unterstichprobe (n=101).

	Min	Median	Mean	Max
Kronensortimente (n=466)				
Länge [m]	2,27	3,06	3,06	5,31
Mittendurchmesser [cm o.R.]	8,12	17,13	18,14	37,42
Stammsortimente (n=278)				
Länge [m]	2,50	2,82	3,59	8,03
Mittendurchmesser [cm o.R.]	3,43	27,45	27,40	41,30

4.2.3 Prozesskostenrechnung

Die in der amerikanischen und englischen Literatur als *Activity Based Costing* (ABC) (COENENBERG 1997, S. 220) bezeichnete Art der Kostenrechnung stellt eine Weiterentwicklung der Vollkostenrechnung dar. Sie zielt darauf ab, die Gemeinkosten entsprechend der tatsächlichen Inanspruchnahme der Produktionskapazitäten auf die Kostenträger umzulegen (MUBHOFF & HIRSCHAUER 2011). Grundlage der

Prozesskostenrechnung sind sich wiederholende Tätigkeiten im Betrieb (*Prozesse* oder *Kostentreiber (cost driver)*), welche für die Bereitstellung von Kostenträgern durchgeführt werden (COENENBERG 1997, S. 225). Die Gesamtaufgabe der Leistungserstellung wird dazu in möglichst kleinteilige (Arbeits-)Prozesse (Hauptprozess, Teilprozess, Prozessschritte) untergliedert. Die Menge der dafür in Anspruch genommenen Produktionskapazitäten bestimmt die *Prozessgröße*, welche als Maßgröße zur Quantifizierung des Outputs eines Prozesses folgende Anforderungen erfüllen muss (COENENBERG 1997, S. 228):

- Einfache Ableitbarkeit aus den verfügbaren Informationsquellen
- Proportionalität zur Beanspruchung der Ressourcen
- Durchschaubarkeit und Verständlichkeit

Im Gegensatz zu der oben beschriebenen Problematik besteht bei der hochmechanisierten Aufarbeitung von Buchenkronen vor allem das Problem, dass die Bereitstellungsprozesse für die Kostenträger nur teilweise bekannt und diese v.a. nicht in ihren Einzelheiten quantifiziert sind. Dem Kostenträger (= Fixlängen) in Form von bspw. 3 m langen Kronenstücken stehen somit unterschiedliche Produktionsprozesse gegenüber. Eine über die Durchschnittsbetrachtung hinausgehende bzw. verursachungsgerechte Zuordnung der Aufarbeitungskosten auf die Produkte ist hingegen nur bei detaillierter Kenntnis der Produktionsprozesse, deren Zeitverbräuche bzw. Kosten möglich.

Wird nur der Aufarbeitungsprozess in der Baumkrone (= Hauptprozess) selbst betrachtet, so beginnt der Prozess mit dem Aufarbeiten des ersten Kronenstückes und endet nach dem Entlassen von nicht aufarbeitungswürdigen Kronenmaterial aus dem Aggregat. Innerhalb des Hauptprozesses werden verschiedene Tätigkeiten (= Prozessschritte) durchgeführt, in deren Ablauf das vorliegende Baumholz in Fixlängen gleicher Länge, aber unterschiedlicher Durchmesser eingeschnitten wird bzw. nicht verwertbares Derb- und Nichtderbholz entsteht. Durch die Verzweigung in der Buchenkrone sind die für Aufarbeitung notwendigen Tätigkeiten vielfältig (vgl. Einführung zu Kapitel 4) und entsprechend sind die Prozessschritte im Vergleich zu der Anzahl der Produkte deutlich größer. Die einzelnen Prozessschritte können dazu je nach Bedarf entsprechend ihrer Zusammengehörigkeit auch zu Teilprozessen verbunden werden (COENENBERG 1997, S. 227).

Die Prozesskostenkalkulation hat die Aufgabe, die Beanspruchung der betrieblichen Ressourcen durch die hergestellten Produkte widerzuspiegeln. Entsprechend müssen die Kosten der Prozessschritte auf die Produkte umgelegt werden. Möglich wird dies durch die Berechnung von *Prozesskostensätzen* aus dem bewerteten Zeitverbrauch je Prozesselement. Anhand dieser Größen und der Kenntnis der Arbeitsprozesse für die Bereitstellung der Produkte wird eine verursachungsgerechte Zuordnung der Kosten auf die Produkte möglich.

4.2.3.1 Zeitverbrauchsstudie

Die Zeitverbrauchsstudie dient der Quantifizierung des Zeitverbrauches einzelner Tätigkeiten bei der hochmechanisierten Aufarbeitung von Buchenkronen und bildet die Grundlage für die Prozesskostenkalkulation. Der Zeitverbrauch [Sek] als relevante Prozessgröße bietet sich hierfür besonders an, da über die Maschinenkostensätze (inkl. Personalkosten) und die Zeitverbräuche direkt die Kosten für die Produktbereitstellung berechnet werden können. Die Datenbasis für die Zeitverbrauchsstudie bildet das Videomaterial (35,7 Std), welches während der Durchführung der beiden Untersuchungsbestände aus dem Harvester heraus aufgenommen wurde (vgl. Kapitel 4.2.2).

Als Verfahren für die Zeiterfassung wurde das Fortschrittzeitsverfahren (FZV) gewählt. Bei dem FZV werden die einzelnen Tätigkeiten (= Arbeitsablaufabschnitte, kurz: AAA) mit ihren Verbrauchszeiten chronologisch in der Reihenfolge des Entstehens festgehalten. Der Messpunkt ist das jeweilige Endereignis des AAA, bspw. der Beginn des Fallvorganges des aufgearbeiteten Sortimentes. In dem fortlaufenden Verfahren stellt das Ende des vorherigen AAA den Beginn des nachfolgenden AAA dar. Neben der Zeit muss die Art des AAA bei der Aufnahme festgehalten werden (REFA & KWF 1984, S. 32). Für die Zeitverbrauchsstudie wurden verschiedene AAA (vgl. ROSE 2013, S. 10f) definiert, welche eine durchgehende Auswertung des Videomaterials ermöglichten. Bei der anschließenden Auswertung waren jedoch nur die AAA *Fixlänge*, *Umgreifen* und *Kronenrest* relevant. Während der *AAA Fixlänge* den Start des Ablängvorganges bis zum Ende des Abtrennvorganges (Fall der abgeschnittenen Fixlänge) einer Fixlänge umfasst, beschreibt der *AAA Umgreifen* das Umgreifen des Aggregates vom Haupt- auf den Seitenast und das Abtrennen des Seitenastes. Dieser AAA endet nach dem erfolgten Trennschnitt. Der *AAA Kronenrest* wiederum beinhaltet den Abwurf des nicht weiter als aufarbeitungswürdig eingeschätzten Kronenmaterials (Reisig). Er beginnt nach dem Trennschnitt des vorhergehenden AAA *Fixlänge* und endet mit dem Abwurf des Reisigs aus dem Aggregat.

Alle übrigen AAA dienen v.a. der Orientierung im Video und gewährleisteten eine durchgehende Videoauswertung. Für weitere Informationen hierzu sei auf ROSE (2013) verwiesen.

Die drei relevanten AAA umfassen nur den Zeitverbrauch, welcher direkt am betreffenden Arbeitsgegenstand entsteht. Aus diesem Grund wird im Rahmen der Zeitverbrauchsstudie nur die Reine Arbeitszeit (RAZ) erfasst. Allgemeine Zeiten (AZ) wie Rüst-, Verteil- und Erholzeiten sind nur teilweise in dem Videomaterial enthalten und sind somit auch nicht vollständig auswertbar (REFA & KWF 1984, S. 57). Auch störungsbedingte Unterbrechungen durch bspw. ein verklemmtes Schwert am Aggregat werden zu den AZ gerechnet und fließen nicht in die Zeitverbrauchsstudie ein.

4.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Kernergebnisse der Zeitverbrauchsstudie dargestellt, welche für die Erstellung des Entscheidungsmodells von Belang sind.

4.3.1 Darstellung des Aufarbeitungsprozesses

Der hochmechanisierte Aufarbeitungsprozess beginnt an einer Buche nach dem Fällvorgang mit der Vorwärtsdrehung der Vorschubwalzen zum Ablängen bzw. Entasten des ersten Sortimentes (= Fixlänge) und endet mit dem letzten Kontakt des Aggregates mit Astteilen der aufgearbeiteten Buche (Abbildung 10, Prozess Start/Ende). Entlang des Stammbereiches besteht der Aufarbeitungsprozess aus einer baumindividuellen Anzahl des Prozessschrittes *Sortiment*, in dessen Folge jeweils Sortimente abgelängt und vom aufzuarbeitenden Hauptast abgeschnitten werden.

Mit Beginn der Krone treten vermehrt Seitenäste auf. Haben deren Verzweigungen einen Astbasisdurchmesser von über 7 cm m.R. (schnittrelevante Verzweigungen, kurz: SRV), so ist das Harvesteraggregat nicht mehr in der Lage durch Vorschub seiner Entastungsmesser den abgehenden Ast abzuschlagen (Vorschubentastung). Wenn auch ein häufiges Vor- und Zurückfahren am aufzuarbeitenden Ast mit dem Risiko von einklemmenden Entastungsmessern oder Aggregatschäden nicht zum gewünschten Entastungserfolg führt, so muss der Seitenast abgeschnitten werden (vgl. dazu SCHORR 2000, S. 521). Hierdurch wird der (Haupt-) Aufarbeitungsprozess am Hauptast unterbrochen und es beginnt an der SRV mit dem zusätzlichen Trennschnitt und der Aufarbeitung des Seitenastes ein neuer Teilprozess (Abbildung 10, gestrichelter Kasten). Der Prozessschritt – zu dem das Ablängen bzw. Abtrennen des Sortimentes mitsamt Trennschnitt für die SRV gehört – wird als *Sortiment mit SRV* bezeichnet.

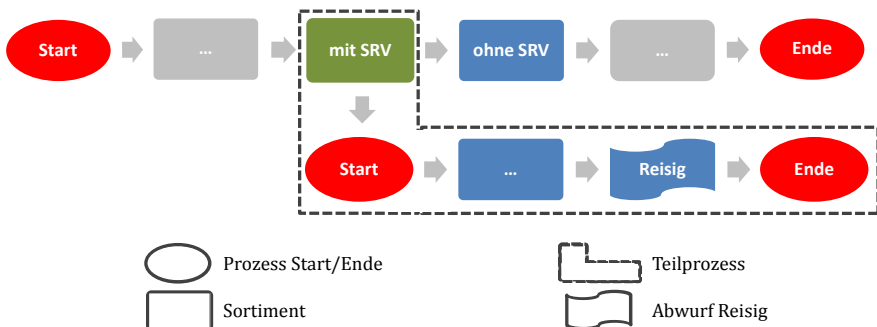


Abbildung 10: Beispielhafter Ablauf eines Aufarbeitungsprozesses einer schnittrelevanten Verzweigung (SRV) mit einem Harvesteraggregat.

Für die Aufarbeitung des Seitenastes wird das gesamte noch aufzuarbeitende Kronenmaterial (Hauptast und Seitenäste) aus dem Aggregat entlassen und auf dem Waldboden abgelegt. Anschließend wird der abzuschneidende Seitenast mit dem Aggregat aufgegriffen und abgeschnitten. Der Manipulationsaufwand zum Ergreifen des Seitenastes ist dabei neben den Aggregateigenschaften und der Befähigung des Maschinenführers einer Vielzahl von Faktoren (Größe, Form und Lage des Astes und anderer Kronenteile, Bodenvegetation, Einsehbarkeit des Astes usw.) unterlegen. Der abgeschnittene Seitenast wird in der Folge wie ein Hauptast aufgearbeitet und der Teilprozess endet nach dem Abwurf des Reisigs (Prozessschritt *Abwurf Reisig*). Bei einer eventuell auftretenden SRV am Seitenast (erster Ordnung) erfolgt wiederum eine Unterbrechung des Aufarbeitungsprozesses durch den Beginn eines neuen Teilprozesses (am Seitenast zweiter Ordnung).

Nach Beendigung der Teilprozesse an den Nebenästen wird der eigentliche Hauptast mit dem Harvesteraggregat – nachdem das Aggregat nach dem Abwurf des Reisigs zurückgeschwenkt wurde – wiederum neu gegriffen und in Sortimente eingeschnitten. Der gesamte Aufarbeitungsprozess am Baum endet mit dem Abwurf des Feinreisigs des Hauptastes.

4.3.2 Verursachungsgerechte Zeitverbrauchszuordnung

Die Kenntnis der Aufarbeitungsprozesse erlaubt die verursachungsgerechte Zuordnung der Zeitverbräuche auf die ausgehaltenen Sortimente. Die Zuordnung wird nur an den Fixlängen im Kronenbereich durchgeführt.



Abbildung 11: Darstellung einer verzweigten (VF) und einer unverzweigten Fixlänge (UVF) nach der Aufarbeitung durch den Harvester.

Durch das Auftreten von SRV werden zwei Verzweigungstypen von Fixlängen aufgearbeitet (Abbildung 11 und Tabelle 5). *Unverzweigte Fixlängen* (kurz: UVF) weisen keine SRV auf, der Zeitverbrauch der Aufarbeitung hängt damit vornehmlich von der Vorschubgeschwindigkeit und dem Sortimentstrennschnitt ab (AAA Sortiment). Potentielle Einflussgrößen auf den Zeitverbrauch sind somit die Länge und der Durchmesser des Kronenstückes. Die Anzahl der unverzweigten Fixlängen in der Studie entspricht derjenigen des Prozessschrittes *Sortiment*.

Verzweigte Fixlängen (kurz: VF) hingegen zeichnen sich durch eine SRV aus, mit deren Auftreten zwangsläufig das Harvesteraggregat am Seitenast angesetzt, dieser abgeschnitten, das Reisig des Seitenastes (ggf. nach Aufarbeitung einiger UVF)

abgeworfen und das Aggregat an den Hauptast zurückgeführt werden muss. Dieser Prozessablauf hinter liegt jedes Mal dem Prozessschritt *Sortiment mit SRV* und folglich sind der VF neben dem AAA *Sortiment* (Ablängen und Trennschnitt) die AAA *Umgreifen* und *Kronenrest* zuzuordnen.

Tabelle 5: Zuordnung der Prozessschritte und Arbeitsablaufabschnitte auf die beiden Typen von Fixlängen.

Fixlänge	Prozessschritte	Arbeitsablaufabschnitte
Unverzweigte Fixlänge (UVF)	Sortiment	Sortiment
Verzweigte Fixlänge (VF)	Sortiment mit SRV Reisig	Sortiment Umgreifen Kronenrest

4.3.3 Baumbezogene Auswertungsergebnisse

In Abbildung 12²³ ist der Zeitverbrauch (kurz: ZV; Sek_{RAZ}/Baum) über den BHD und getrennt nach den Kronentypen für die Aufarbeitung der 407 untersuchten Buchen aufgetragen. Die Punktwolken der drei Kronentypen weisen einen gleichförmigen Anstieg der Aufarbeitungszeit mit steigendem BHD auf, wobei die Streuung einen sehr weiten Bereich abdeckt und insbesondere bei den BHD 350 bis 400 mm am weitesten ist (rd. 200 Sekunden).

²³ Diese Abbildung ist der vom Autor betreuten Bachelorarbeit von ROSE (2013) entnommen.

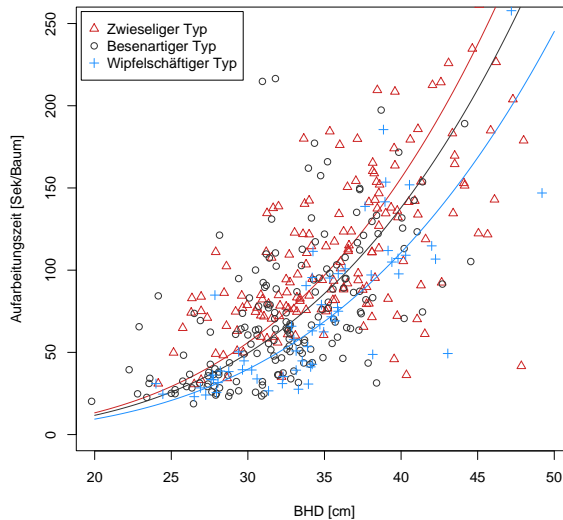


Abbildung 12: Zeitverbrauch für die Aufarbeitung des gesamten Baumes mit nicht-linearer gleichungsfunktion in normaler Form (Zwieseliger Kronentyp: $n=168$; besenartiger Kronentyp: $n=177$; wipfelschäftiger Kronentyp: $n=62$) (ROSE 2013, S. 14).

Die mittlere ZV-Beziehung zwischen Kronentyp und BHD wird anhand von nicht-linearen Regressionen quantifiziert (vgl. Formel 15 bis Formel 17; Input: BHD [cm]; Output: ZV [Sek/Baum]) und dabei wird als Regressionsmethode die *Standardised Mayor Axis* (SMA) verwendet (R-Paket *smatr*). Hierfür werden anhand einer simulierten, linearen Hauptachse (Residuenachse) im doppelt logarithmierten Raum die Parameter $\ln(\beta)$ (Intercept) und α (Steigung) geschätzt. Die doppelte Logarithmierung der Daten führt zu einer Homogenisierung der Varianz, sodass sich die Parameter über die Abweichungen von der linearen Residuenachse schätzen lassen und somit das Regressionsmodell insgesamt einfacher zu interpretieren ist (HUSMANN 2013, S. 16). Die Bedingung für die Anwendung dieser Methode der Anpassung ist eine homogene Varianz der Residuen (um die Hauptachse). Bei dem Parameter λ handelt es sich um einen Korrekturfaktor, welcher für die Rücktransformation linear geschätzter Parameter notwendig ist (vgl. SPRUDEL, 1983; HUSMANN 2013, S. 17). Die Funktionen sind wie folgt aufgebaut²⁴:

²⁴ Der Funktionsaufbau entspricht denjenigen allometrischer Modelle (vgl. Kapitel 5.2.1). Eine alternative Regressionsmethode, bei der nicht eine homogen streuende Varianz um die Residuenachse Bedingung ist, ist *Generalized Least Squares* des R-Pakets *nlme*. Diese Methode zeigte allerdings in diesem Fall – da hier es sich hierbei um eine homogen

$$y = e^{\ln(\beta) + \alpha \cdot \ln(x)} * \lambda$$

Formel 14

Die Homogenität der Varianz ist der Abbildung 13 (mit doppelt logarithmierter Skalierung) zu entnehmen. Entsprechend ist der Anstieg der Streuung in der Abbildung 12 primär auf den größeren Wertebereich zurückzuführen, da die Varianz zwischen Aufarbeitungszeit und BHD gleichbleibend ist. Deutlich wird, dass die Ausgleichsgeraden der drei Kronentypen eine gleiche Steigung aufweisen und sich nur im Intercept unterscheiden. In der nicht-logarithmierten Form bedeutet dies wiederum, dass lediglich der Parameter $\ln(\beta)$ sich zwischen den Kronentypen unterscheidet (vgl. Formel 15 bis Formel 17).

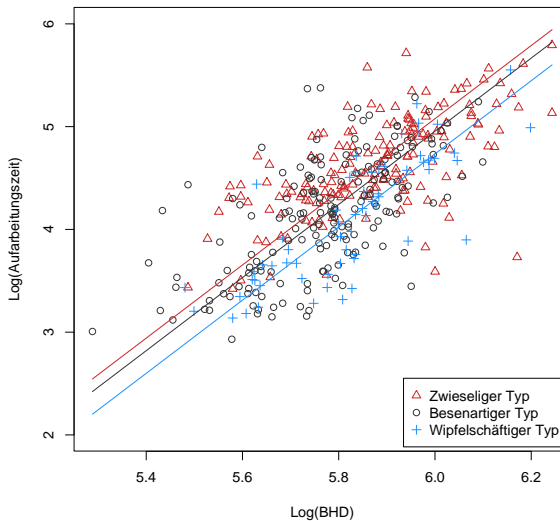


Abbildung 13: Zeitverbrauch für die Aufarbeitung des gesamten Baumes mit linearer Funktion in doppelt skalierten Form (Zwieseliger Kronentyp: $n=168$; besenartiger Kronentyp: $n=177$; wipfelschäftiger Kronentyp: $n=62$) (ROSE 2013, S. 14).

Im Vergleich zum (mittleren) besenartigen Kronentyp weisen Bäume mit zwieseligen Kronen im Durchschnitt einen 12,8 % höheren, mit wipfelschäftigen Kronen

streuende Varianz handelt – keine bessere Anpassung an die Punktwolken. In anderen Fällen jedoch (vgl. Kapitel 6.3 und folgende Kapitel) wird trotz nicht homogener Streuung auf diese Regressionsmethode zurückgegriffen, da es das Ziel des Autors ist, statt vieler unterschiedlicher Regressionsmodelle in dieser Dissertationsschrift, sich auf eine einheitliche Regressionsmethode zu fokussieren und somit eine bessere Vergleichbarkeit der Ergebnisse zu schaffen.

hingegen einen 20 % geringeren Zeitverbrauch auf. Dieser Unterschied resultiert fast ausschließlich aus der Verzweigung in der Krone, da im Stammbereich nur sehr geringe Unterschiede auftreten sind. Der Unterschied liegt zwischen den drei Kronentypen im Mittel über alle Bäume bei nur 1,5 Sekunden (Median = 29,3 Sek/Baum).

$$ZV_{\text{Baum m. Zwieselkr.}} = e^{-8,090716 + \ln(\text{BHD}) * 3,561932} * 1,0015 \quad R^2 = 0,40; p < 2,22 * 10^{-16} \\ \text{Formel 15}$$

$$ZV_{\text{Baum m. Besenkr.}} = e^{-8,213017 + \ln(\text{BHD}) * 3,561932} * 1,0015 \quad R^2 = 0,41; p < 2,22 * 10^{-16} \\ \text{Formel 16}$$

$$ZV_{\text{Baum m. wipfels.Kr.}} = e^{-8,433329 + \ln(\text{BHD}) * 3,561932} * 1,0015 \quad R^2 = 0,65; p < 2,66 * 10^{-15} \\ \text{Formel 17}$$

Der Anteil der gesamten Aufarbeitungszeit am Baum, welche der Aufarbeitung der Buchenkrone gewidmet wurde, zeigt Abbildung 14. Neben den Punktwolken für die einzelnen Kronentypen werden hierbei auch die mittleren Aufarbeitungsanteile (jeweils als Mean) als farbige Linien dargestellt. Insgesamt zeigt sich ein deutlich erhöhter Zeitanteil bei dem zwieseligen Typen mit 73 %, bei den besenartigen bzw. wipfelschäftigen Typen sind es lediglich 56 % bzw. 52 %. Bei den beiden letzten Typen existieren über den gesamten BHD-Bereich starke Überschneidungen, wohingegen die zwieseligen Typen bis auf wenige Ausreißer hohe Anteilszeiten in der Kronenaufarbeitung aufweisen.

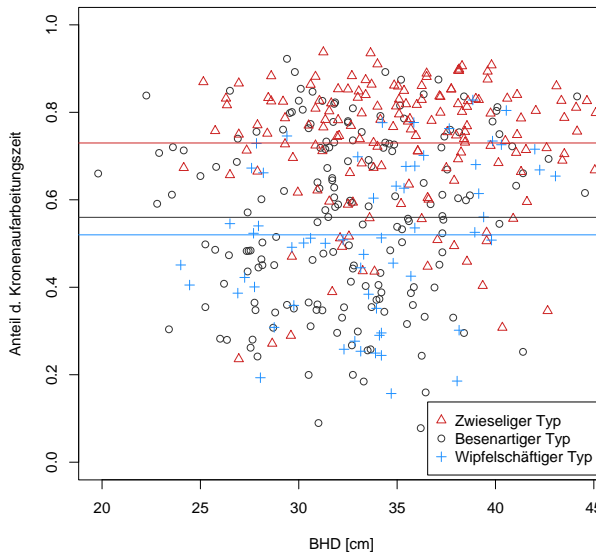


Abbildung 14: Anteil der Aufarbeitungszeit in der Krone getrennt nach Kronentypen.

4.3.4 Stückbezogene Auswertungsergebnisse

Abbildung 16 zeigt die mittlere Anzahl der ausgehaltenen Fixlängen in den Kronen getrennt nach BHD-Klassen und den Kronentypen ($n_{\text{Fixlängen}} = 1923$). Deutlich ist ein degressiv verlaufender Anstieg der Anzahl der Fixlängen mit steigendem BHD von rd. 2 auf 8 erkennbar²⁵. Hierbei liegt die Häufigkeit der Fixlängen bei den zwieseligen Kronentypen um rd. 2 Stücke über denen der übrigen Kronentypen. Die besenartigen und wipfelschäftigen Kronentypen sind hinsichtlich der Häufigkeit der Fixlänge recht ähnlich und weisen in ihrer Rangfolge keine klare Struktur auf.

²⁵ Auf Grund des geringen Stichprobenumfangs in den Klassen 45-49 und 50-54 wird auf eine Interpretation der Stückzahlen bzw. Kronenreste verzichtet. Gleichwohl sind die dort enthaltenen Stücke wichtig für weitere Analysen bspw. hinsichtlich des stückbezogenen Zeitverbrauchs.

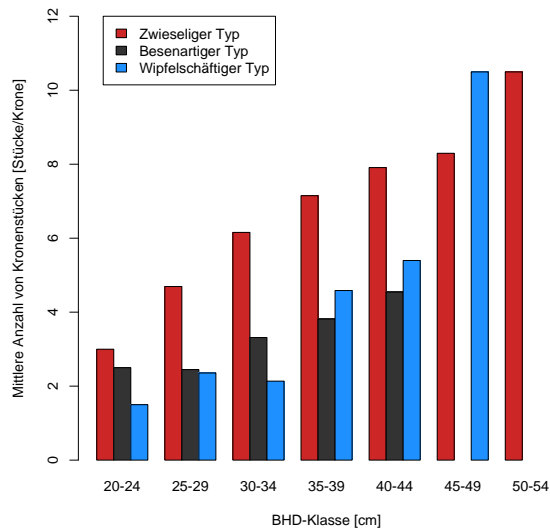


Abbildung 15: Mittlere Anzahl von allen Fixlängen aufgetragen über 5 cm breite BHD-Klassen und getrennt nach Kronentypen.

Die Anzahl der VF ist in der Abbildung 16 abgebildet (ROSE 2013, S. 16). Auch hierbei zeigt sich ein degressiver Verlauf bzw. eine höhere Häufigkeit bei den zwieseligen Kronentypen, wobei sich maximal im Mittel 1,5 VF in den Kronen befinden. Somit bewegt sich die Anzahl auf einem insgesamt geringen Niveau.

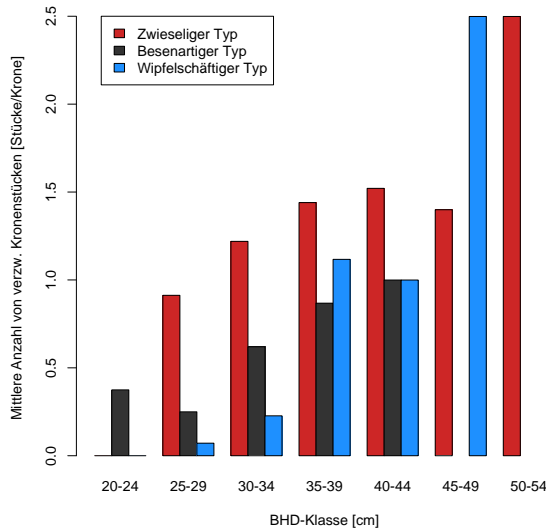


Abbildung 16: Mittlere Anzahl von verzweigten Fixlängen aufgetragen über 5 cm breite BHD-Klassen und getrennt nach Kronentypen.

Ein Ergebnis aus der Auswertung der Unterstichprobe zeigt Abbildung 17 (links) (ROSE 2013, S. 17). Die dort aufgezeigten Zeitverbräuche für VF berücksichtigen nur die direkt auf die Kronenstücke zuordenbaren AAA *Sortiment* und *Umgreifen*. Der AAA *Kronenrest* hingegen ist – da er nicht auf das jeweilige Kronenstück zuordenbar ist – nicht einbezogen. Aus der Abbildung ist aber auch ohne den AAA *Kronenrest* ersichtlich, dass zum einen die VF (rote Dreiecke) einen deutlich höheren Zeitverbrauch gegenüber den UVF (schwarze Kreise) aufweisen. Weiterhin weist die weite Streuung beider Punktwolken auf einen Durchmesser-unabhängigen Zeitverbrauch hin. Viel mehr scheinen andere Faktoren der Zeitverbrauch zu bestimmen. Insgesamt ist somit für die hochmechanisierte Kronenholzaufarbeitung von einem BHD-unabhängigen, jedoch stark streuenden Zeitverbrauch (getrennt für die Kronenstücktypen) auszugehen.

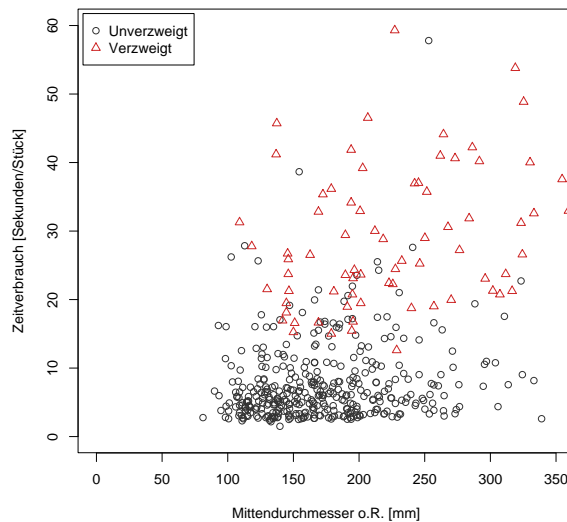


Abbildung 17: Stückbezogener Zeitverbrauch für Fixlängen (ohne AAA Kronenrest) in der hochmechanisierten Ernte in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser bzw. Verzweigungstyp ($n_{\text{unverzweigt}} = 387$, $n_{\text{verzweigt}} = 79$) der Unterstichprobe (ROSE 2013, S. 17).

Abbildung 18 zeigt den stückbezogenen Zeitverbrauch für die beiden Verzweigungstypen der Fixlängen, diesmal auf Grund des größeren Stichprobenumfangs berechnet auf Basis der gesamten Stichprobe ($n_{\text{Kronenstücke}} = 1923$). Auf Grund der häufigen Ausreißer im Datensatz wird der Median als Referenzgröße herangezogen.

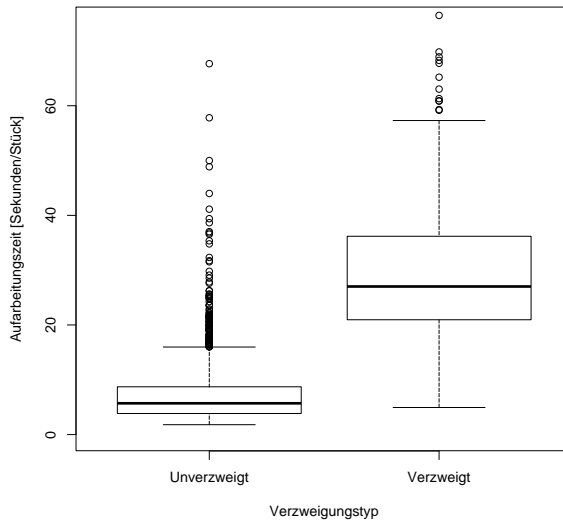


Abbildung 18: Stückbezogener Zeitverbrauch für Fixlängen (ohne AAA Kronenrest) in der hochmechanisierten Ernte getrennt nach Verzweigungstyp ($n_{\text{unverzweigt}} = 1579$, $n_{\text{verzweigt}} = 344$) der gesamten Stichprobe ($n_{\text{Kronenstücke}} = 1923$) (ROSE 2013, S. 17).

Der Zeitverbrauch einer VF (ohne AAA Kronenrest) liegt bei dem 4,74 fachen der UVF (Tabelle 6).

Tabelle 6: Beschreibende Statistik der Aufarbeitungszeit der 1923 untersuchten Fixlängen getrennt nach Verzweigungstyp.

	N	Min [Sek/Stk]	Median [Sek/Stk]	Mean [Sek/Stk]	Max [Sek/Stk]
Unverzweigt	1579	1,80	5,70	6,17	88,63
Verzweigt	344	4,94	27,02	30,15	115,10

Die mittlere Anzahl des Prozessschrittes *Abwurf Reisig* in Abhängigkeit von der BHD-Klasse und dem Kronentyp zeigt Abbildung 19. Sehr ähnlich den Balkendiagrammen zur durchschnittlichen Fixlängenanzahl bzw. Anzahl verzweigter Fixlängen (vgl. Abbildung 16) weisen die Häufigkeiten einen leicht degressiven Verlauf auf, wobei bis auf die geringste Durchmesserklasse die zwieseligen Kronentypen die höchste Häufigkeit des Prozessschrittes besitzen. Insgesamt tritt dieser Prozessschritt zwischen ein- und dreimal pro Baum auf.

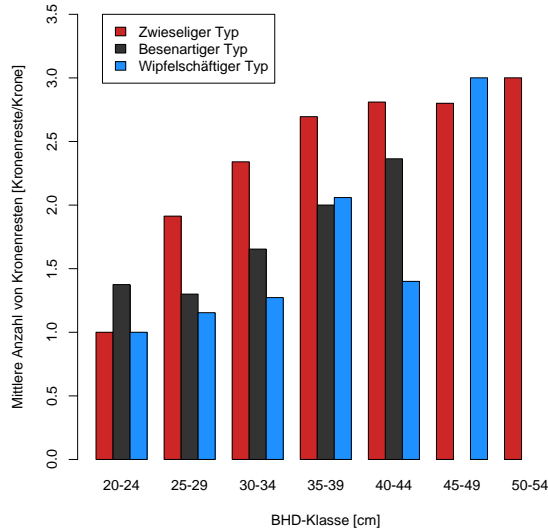


Abbildung 19: Mittlere Anzahl des Prozessschrittes *Abwurf Reisig* aufgetragen über 5 cm breite BHD-Klassen und getrennt nach Kronentypen (ROSE 2013, S. 19).

Auch in diesem Prozessschritt weisen die Zeitverbrauchswerte sehr viele Ausreißer auf (Tabelle 7), sodass auch in diesem Fall der Median als Maß für den Zeitverbrauch gewählt worden ist.

Tabelle 7: Beschreibende Statistik des Zeitverbrauchs für den Prozessschritt *Abwurf Reisig* über alle Kronentypen.

	N	Min [Sek/Stk]	Median [Sek/Stk]	Mean [Sek/Stk]	Max [Sek/Stk]
Kronenreste	828	1,03	2,90	3,76	31,22

Entsprechend Tabelle 8 beläuft sich die Gesamtzeit für die Bereitstellung einer VF auf insgesamt 29,92 Sekunden. Somit werden für die Bereitstellung eines VF insgesamt 24,22 Sekunden mehr bzw. die 5,25 fache Zeit gegenüber einem UVF benötigt.

Tabelle 8: Zeitverbrauch für unverzweigte und verzweigte Fixlängen inkl. Zeiten für das Abwerfen des Reisigs.

	Stückauf- arbeitung [Sek/Stk]	Abw. Reisig [Sek/Stk]	Gesamtzeit [Sek/Stk]
Unverzweigte Fixlänge	5,70	-	5,7
Verzweigte Fixlänge	27,02	2,90	29,92

4.4 Schlussfolgerungen

Für die Erstellung eines Entscheidungsmodells zur Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen können aus der durchgeführten Prozesskostenanalyse verschiedene Schlussfolgerungen gezogen werden.

Die Kostentreiber sind die schnittrelevanten Verzweigungen, welche ab einem Astbasisdurchmesser des abzutrennenden Seitenastes von über 7 cm m.R. auftreten. Allein diese Verzweigungen führen in der Aufarbeitung zu einem zusätzlichen Zeitverbrauch von 24,22 Sekunden/Fixlänge. Dabei steigt die Anzahl der SRV mit steigendem BHD an.

Die Anzahl der SRV und damit der Zeitverbrauch sind abhängig vom Kronentyp. Frühzeitig am Stamm verzweigende Kronentypen (zwieselförmiger Typ) weisen eine höhere Anzahl an SRV gegenüber später verzweigenden Typen (besenförmiger bzw. wipfelschäftiger Typ) auf. Auch die Anzahl der Fixlängen in den Kronen ist größer. Somit hat bei dieser Fallstudie die Kronenmorphologie einen Einfluss auf die entstehenden Kosten und dies sollte sich auch in der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität wiederfinden.

Die stückbezogene Aufarbeitungszeit in der hochmechanisierten Holzernte ist unabhängig von dem Durchmesser des aufzuarbeitenden Astes. Hingegen kann auf Grund des Arbeitsablaufes (Durchziehen der Äste durch das Harvesteraggregat) von einem längenabhängigen Zeitverbrauch ausgegangen werden.

5 Entscheidungsmodell zur Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität

In diesem Kapitel werden die Grundlagen für das Entscheidungsmodell zur Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen vorgestellt. Im ersten Unterkapitel werden die Modellziele und die Modellkonzeption vorgestellt. Es folgt darauf die Beschreibung des RBS-Verfahrens und der zugehörigen Datengrundlage, bevor die ökonomische Bewertung des Aufarbeitungsverfahrens und der Optimierungsalgorithmus vorgestellt werden. Das Kapitel endet mit der Klassifizierung von Kronentypen auf Basis des RBS-Verfahrens, welche zur späteren Faktoranalyse (vgl. Kapitel 6) herangezogen werden.

5.1 Modellziel und -konzeption

Mit dem Entscheidungsmodell werden folgende zwei Hauptziele verfolgt:

1. Entscheider sollen bei der Identifikation des ökonomisch optimalen Grenzzopfes und damit der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität unterstützt werden.
2. Durch die Einbindung von Kronentypen und unterschiedlicher Kosten-Erlös-Varianten soll dem Entscheider die Sensibilität der Outputgrößen bei Änderung der Inputgrößen aufgezeigt werden.

Die Zielgröße des Modells ist der maximale erntekostenfreie Erlös (EKFE), welcher verfahrensspezifisch (vgl. Kapitel 5.3.1) und anhand von einem rekursiv ablaufenden Optimierungsalgorithmus (vgl. Kapitel 5.3.2) auf Basis des Randomized Branch Samplings (vgl. Kapitel 5.2.2) bestimmt wird.

Das Modellkonzept sieht wie folgt aus (Abbildung 20):

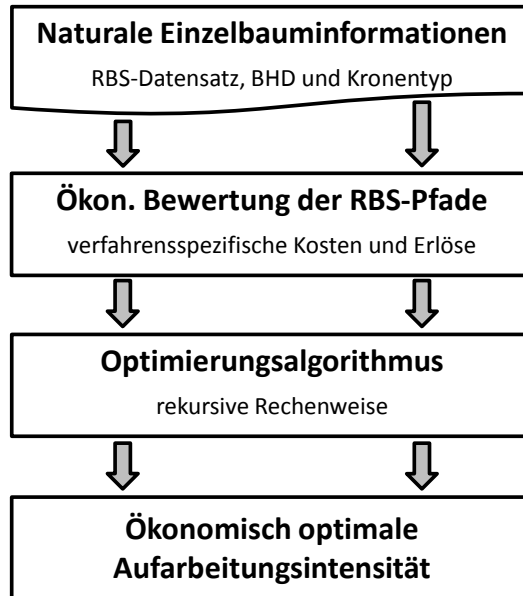


Abbildung 20: Modellkonzeption für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität.

Im Modell²⁶ wird in zwei Schritten die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität berechnet. Die Grundlage für die folgenden Schritte bilden die naturalen Einzelbauminformationen, welche das baumartenspezifische Produktionsmodell repräsentieren und im Wesentlichen aus drei Komponenten (RBS-Datensatz, BHD und Kronentyp) bestehen. Der RBS-Datensatz hat für die anschließende ökonomische Bewertung bzw. den Optimierungsalgorithmus die größte Bedeutung. Die beiden Komponenten BHD und Kronentyp spielen insbesondere bei der sich später anschließenden Auswertung der Optimierungsergebnisse eine Schlüsselrolle.

Im ersten Berechnungsschritt werden die drei RBS-Pfade an jedem Einzelbaum ökonomisch anhand von verfahrensspezifischen Kosten und Erlösen auf Basis einer stückbezogenen Deckungsbeitragsrechnung (Kapitel 5.3.1) bewertet

²⁶ Das Modell und alle zugehörigen Datenbankoperation, Datenanalysen bzw. –darstellungen sind anhand des Statistikpakets R für Windows 3.0.2 32bit geschrieben (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2013). Mit Ausnahme des RBS-Datensatzes kann der R-Code über das Sekretariat der Abteilung für Forstökonomie und Forsteinrichtung der Georg-August-Universität Göttingen bezogen werden.

(ohne Optimierung). Darauf folgt im zweiten Schritt der Optimierungsalgorithmus (Kapitel 5.3.2), welcher mit rekursiver Rechenweise die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität bestimmt.

In den folgenden Unterkapiteln wird auf die einzelnen Modellkomponenten und deren zu Grunde liegende Methodik eingegangen.

5.2 Randomized Branch Sampling

Das Randomized Branch Sampling (RBS) ist ein mehrstufiges, biasfreies Stichprobenverfahren und wurde in der Vergangenheit zur Schätzung von Pflanzenparametern wie Nadel-, Blatt- und sonstigen Biomassen eingesetzt. Ursprünglich ist es von JESSEN (1955) zur Schätzung von Früchten an Obstbäumen entwickelt und in der Folge zu Schätzung von Blatt-, Nadel- und Astrockenmassen von Waldbäumen (VALENTINE & HILTON, 1977; VALENTINE et al., 1984; GAFFREY & SABOROWSKI, 1999; SABOROWSKI & GAFFREY, 1999) sowie in neuester Zeit zur Schätzung von Biomasse bzw. der Masse wichtiger Pflanzennährstoffe von Vollbäumen und Baumkompartimenten (KÄNDLER & BÖSCH 2009; RUMPF et al. 2011) genutzt worden. Eine Nutzung des RBS zur Schätzung von ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensitäten erfolgte bis auf die Masterarbeit von HUSMANN (2013) – welche im Rahmen dieses Dissertationsvorhabens erstellt und entsprechend von dem Autoren dieser Dissertationsschrift auch betreut wurde – bisher nicht.

5.2.1 Allometrie

Mit den Beziehungen zwischen Organgrößen und anderen biologischen Größen von Organismen beschäftigt sich die Lehre der *Allometrie* (griechisch *allos* „anders“ bzw. *metrie* „messen“). Da die Volumen- und EKFE-Schätzungen über das RBS-Verfahren (vgl. Kapitel 5.2.2) auf allometrischen Beziehungen zwischen einer Hilfsgröße und der Zielgröße basieren, wird im Folgenden kurz auf die Grundlagen der Allometrie eingegangen.

Allometrien können bei der Individualentwicklung einer Art innerhalb unterschiedlicher Altersstadien (*ontogenetische Allometrie*), zwischen gleichalten und unterschiedlich großen Individuen einer Art (*intraspezifische Allometrie*) oder zwischen nah verwandten, jedoch ebenfalls unterschiedlich großen Individuen unterschiedlicher Arten (*interspezifische Allometrie*) betrachtet werden. Die quantitative Beschreibung der Beziehungen erfolgt nach NIKLAS (1994, S. 15) über folgende Allometriegleichung (*power function equation*) (Formel 18).

$$y = \beta * x^\alpha \qquad \text{Formel 18}$$

Hierbei repräsentieren y und x die Organ- oder Körperteilgrößen, die Integrationskonstante β hingegen bildet die Einflüsse ab, welche außer der Größe x die

Größe y beeinflussen. Der Exponent α wird Proportionalitätsexponent oder Allometrieexponent genannt und ist ein Maß für das relative Wachstumsverhältnis beider Organ- bzw. Körperteilgrößen. Bei einem α von 1 liegt Isometrie vor, hingegen handelt es sich bei einem $\alpha < 1$ um eine negative, bei einem $\alpha > 1$ um eine positive Allometrie. Nach WEST et al. (1999A, S. 1677; 1999B, S. 666) existieren eine Vielzahl unterschiedlich skaliertes Exponenten für die Beschreibung von allometrischen Beziehungen innerhalb von Pflanzen.

Zur regressionsanalytischen Prüfung empfiehlt es sich die Allometriegleichung zur Basis e zu logarithmieren, wodurch aus der Potenzfunktion eine Gerade wird (NIKLAS 1994, S. 15; Formel 19).

$$\ln(y) = \ln(\beta) + \alpha * \ln(x) \quad \text{Formel 19}$$

Der Allometrieexponent α wird hierdurch zur Steigung der Gerade, wodurch das Regressionsmodell und die statistische Interpretation vereinfacht werden. Zudem wirkt die Logarithmierung varianzstabilisierend, da mit steigender Größe des Objektes (bspw. der BHD) i.d.R. der Mess- bzw. Schätzfehler (bspw. Kronennutzungsvolumen) ansteigt und folglich die Residuenstreuung eine Trichter ähnliche Form annimmt. Die doppelte Logarithmierung bewirkt somit eine Normierung des Messfehlers bzw. der Residuen unabhängig von der Größe des Objektes. Eine allometrische Beziehung ist dabei strenger, je geringer die Streuung im doppelt logarithmierten Plot ist.

Nach MEYER (1941) bedarf die Rücktransformation logarithmierter allometrischer Regressionsmodelle eines Korrekturfaktors λ , da sich die Funktion um die unbekannte Differenz zwischen Mean und Median verschiebt und es daher zu einer tendenziellen Unterschätzung der wahren Werte kommt (Bias). Diesem Bias kann durch die Berechnung des Korrekturfaktors, welcher über den Residuenstandardfehler des linearen Regressionsmodells geschätzt wird (vgl. SPRUGEL 1983, S. 209), entgegen gewirkt werden. Entsprechend lautet die rücktransformierte allometrische Funktion somit entsprechend Formel 20.

$$y = e^{\ln(\beta) + \alpha * \ln(x)} * \lambda \quad \text{Formel 20}$$

Die Anpassungen der Regressionsmodelle bzw. die Bestimmung der Modellparameter erfolgt über die *Standardised Mayor Axis*-Methode mit dem R-Paket *smatr*.

5.2.2 Methodik des RBS

Gemäß GREGOIRE et al. (1995, S. 1182) werden zur Beschreibung des RBS-Verfahrens die Begriffe *Ast* (branch), *Segment* (segment), *Knoten* (node) und *Pfad* (path) verwendet. Als Ast wird grundsätzlich der gesamte Pflanzenteil bezeichnet, der sich aus einer lateralen oder terminalen Knospe entwickelt und dieser besteht ausgehend von dem Astansatz aus einer Abfolge von Segmenten (Astteilen) und Knoten (Verzweigungspunkten). Ein Segment wird dabei als Teil eines lebenden Astes zwischen zwei Verzweigungspunkten bzw. Knoten beschrieben. „Ein Kno-

ten kann dabei ... ein Quirl, eine Gruppe von Quirlen oder irgendeine andere Verzweigungsstelle sein, aber nicht jede Verzweigung muss auch als Knoten angesehen werden. Die Festlegung der Knoten richtet sich nach praktischen Gesichtspunkten“ (SABOROWSKI & GAFFREY 1999, S. 224). Ein Pfad wiederum besteht ebenfalls aus einer Abfolge von Segmenten und Knoten. Im Gegensatz zum Ast verläuft jedoch ein Pfad nur über den abzuschätzenden Bereich am Baum²⁷ (Abbildung 21 c und d) und kann dadurch an unterschiedlichen Knoten beginnen bzw. enden (Abbildung 21d). Die Anzahl der möglichen RBS-Pfade an einem Baum richtet sich nach der Anzahl der Terminalknospen in der Krone (GREGOIRE & VALENTINE 2008, S. 406) (Abbildung 21 b). Jede Terminalknospe stellt ein mögliches Endsegment eines RBS-Pfades dar, wodurch die Anzahl der Terminalknospen die Grundgesamtheit der möglichen RBS-Pfade am Baum definiert.

²⁷ In dieser Studie verläuft der RBS-Pfad vom Baumstubben in 0,25 m Höhe bis zur Terminalknospe.

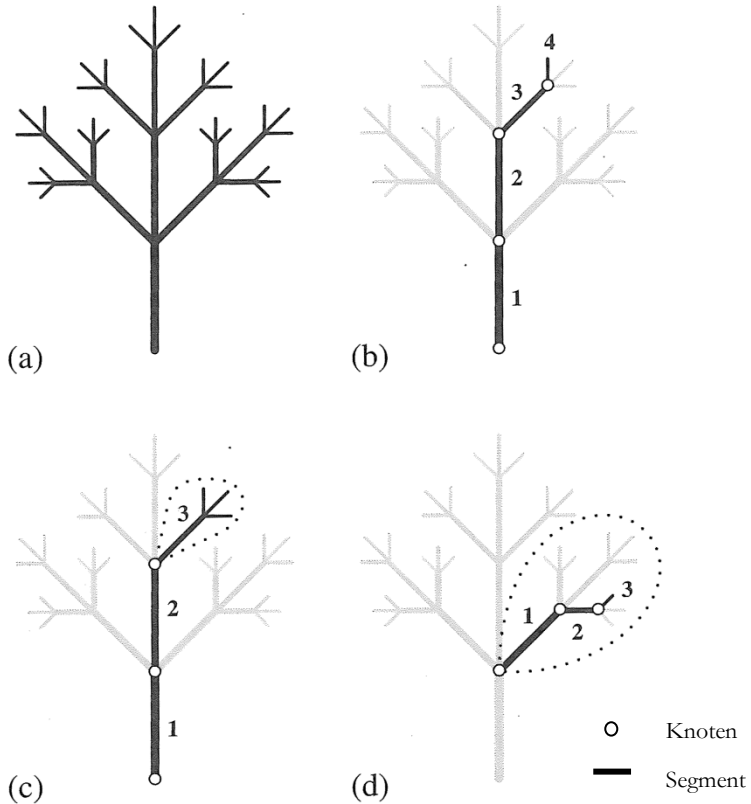


Abbildung 21: (a) Modellbaum mit 40 Segmenten und 27 möglichen Pfaden vom Baumstumpf bis zu den 27 Terminalknoten; (b) ein möglicher Pfad bestehend aus 4 Knoten und 4 Segmenten; (c & d) RBS-Pfade können an allen Knoten beginnen bzw. enden und nur Teilbereiche des Baumes schätzen (mit Punkten eingegrenzter Bereich am Pfad) (GREGOIRE & VALENTINE, 2008, S. 406).

Das RBS-Verfahren setzt wie bereits in Kapitel 5.2.1 beschrieben eine allometrische Beziehung zwischen der zu schätzenden Zielgröße und einer leicht zu messenden Hilfsgröße voraus. Nach WEST et al. (1999A, S. 1677; 1999B, S. 666) ist das (zu schätzende) Astholzvolumenwachstum x proportional zur 2,67ten Potenz des Durchmesserwachstums y , und dies unabhängig von der Größe des Durchmessers (d. h. $x \propto y^{2,67}$). Werden nun Abbildung 22 a bis f folgend ausgehend vom Baumstubb die einzelnen Segmente bzw. Knoten in Länge und Durchmesser (Astbasis- bzw. oberer Segmentdurchmesser) entlang eines Pfades vermessen, so errechnet sich die Auswahlwahrscheinlichkeit q für jeden Ast j an dem jeweiligen Knoten l mit n_l -lebenden Ästen auf Basis der allometrischen Beziehung von Hilfsgröße d (Astbasisdurchmesser) und Zielgröße (Formel 21).

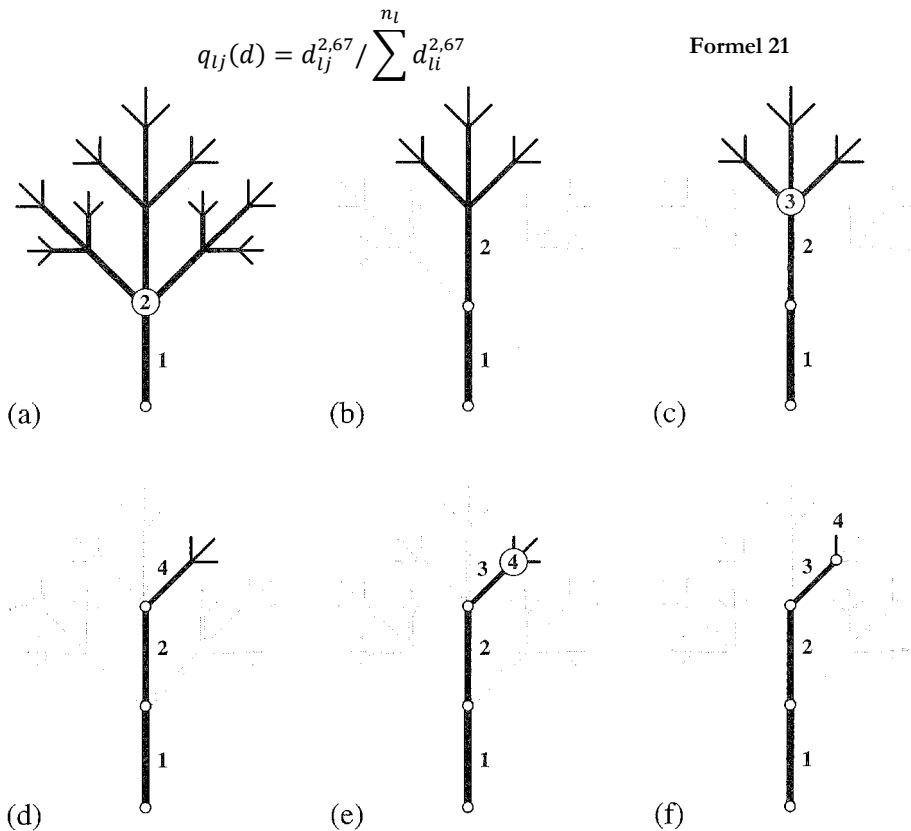


Abbildung 22: (a) Der untere Knoten des ersten Segmentes ist definiert als der erste Knoten, (b) am zweiten Knoten wird ein Ast mit der Auswahlwahrscheinlichkeit q_2 ausgewählt. (c) Am dritten Knoten wird wiederum einer der Äste mit der Auswahlwahrscheinlichkeit q_3 gezogen, wodurch das dritte Segment am Pfad fixiert wird. (e) Bei dem vierten Knoten wird entsprechend verfahren (f) bis die Terminalknospe erreicht ist (GREGOIRE & VALENTINE, 2008, S. 407).

Die Auswahl des Astes j am l -ten Knoten bzw. Segment (Abbildung 22 a) erfolgt nach Normierung der Auswahlwahrscheinlichkeiten auf ein Intervall $[0,1]$ durch Ziehung einer gleichverteilten Zufallszahl. Ein Segment erhält folglich – da dort immer nur ein Ast ansetzt – im Gegensatz zum Knoten die Auswahlwahrscheinlichkeit von eins. Das zweite Segment (Abbildung 22 b) reicht dann bis zum dritten Knoten (Abbildung 22 c), wobei der obere Segmentdurchmesser der Basisdurchmesser vom dritten Knoten ist. Die Auswahlwahrscheinlichkeiten der Äste am dritten Knoten werden wiederum über deren Astbasisdurchmesser bestimmt.

Der durch die Zufallszahl bestimmte Ast bildet mit seinem Astbasisdurchmesser den oberen Knotendurchmesser.

Das Volumen eines l -ten Knotens bzw. Segmentes wird entsprechend der Formel eines Kegelstumpfes aus dem oberen (r_o) und unteren Radius (r_u) sowie der Segment- bzw. Knotenlänge h berechnet (RUMPF et al. 2011, S. 33)(Formel 22).

$$V_l(h_l, r_{lu}, r_{lo}) = h_l * \frac{\pi}{3} * (r_{lu}^2 + r_{lu} * r_{lo} + r_{lo}^2) \quad \text{Formel 22}$$

Besteht ein Pfad aus L Astsegmenten bzw. Knoten und sei q_l mit $l = 1, \dots, L$ die bedingte Auswahlwahrscheinlichkeit des jeweilig zufällig gezogenen, l -ten Segmentes, so ist das Produkt der bedingten Wahrscheinlichkeiten bis zum l -ten Segment die unbedingte Wahrscheinlichkeit Q_l (Formel 23) (SABOROWSKI & GAFFREY 1999, S. 224).

$$Q_l(q) = \prod_{i=1}^l q_i, l = 1, \dots, L \quad \text{Formel 23}$$

Ist beispielsweise das Holzvolumen V_l des l -ten Segmentes (oder Knotens) des ausgewählten Pfades bekannt, so kann über die Hilfsvariable das Gesamtholzvolumen \hat{V}_l auf der Stufe l des Stratums und damit über Formel 24 auf den gesamten Pfad als Summe der Volumen aller Stufen hochgerechnet werden (Abbildung 23). Entsprechend wird bei anderen Zielgrößen wie beispielsweise dem Erlös oder den Kosten verfahren. Hierbei wird dieselbe Proportionalität wie für die Schätzung des Astholzvolumens²⁸ für die anfallenden Erlöse und Kosten angenommen.

$$\hat{V}(\hat{V}(l)) = \sum_{l=1}^L \hat{V}(l) = \sum_{l=1}^L \frac{V_l}{Q_l} \quad \text{Formel 24}$$

²⁸ Das Astholzvolumenwachstum ist proportional zur 2,67 Potenz des Astdurchmesserwachstums (WEST et al. 1999A, S. 1677; 1999B, S. 666).

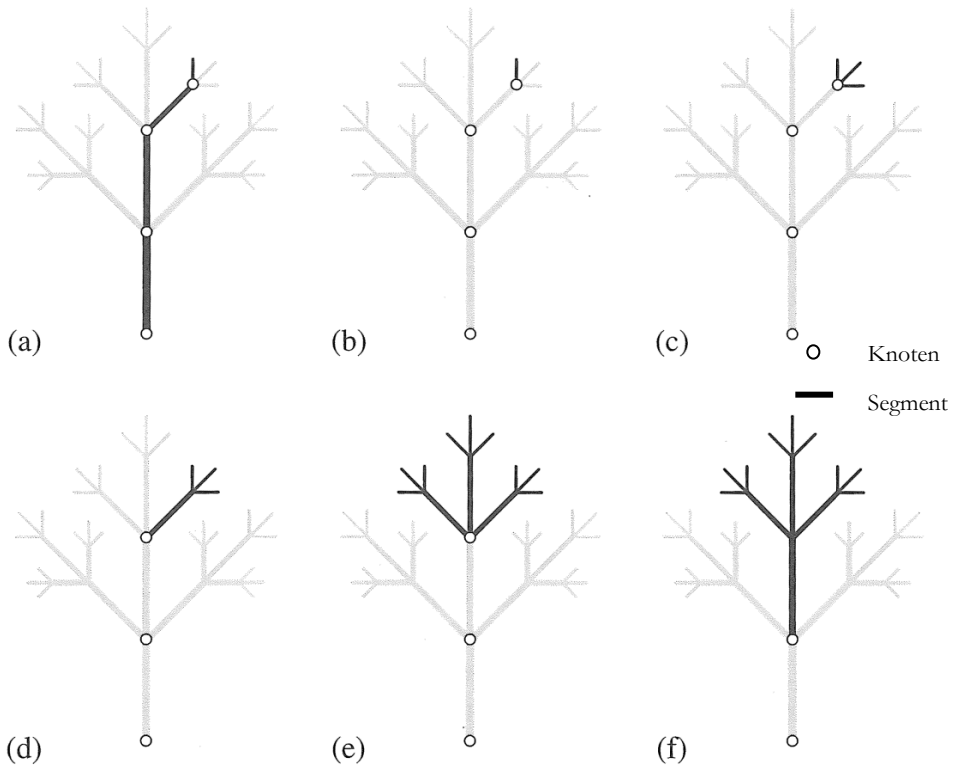


Abbildung 23: Mehrstufige Schätzung des Baumholzvolumens aus (a) einem Pfad mit 4 Segmenten. (b) Das Holzvolumen des vierten Segments dividiert durch seine Auswahlwahrscheinlichkeit q_4 ergibt das (c) Holzvolumen der vierten Ordnung. Dieses (d) Holzvolumen addiert um das 3. Segmentholzvolumen und dividiert durch die Auswahlwahrscheinlichkeit q_3 ergibt das (e) Holzvolumen der dritten Ordnung. Dies wird (f) bis zum Ende des Pfades zu fortgesetzt (GREGOIRE & VALENTINE, 2008, S. 413).

Zur Schätzung des Gesamtvolumens \bar{V} eines Baumes reicht nach RUMPF et al. (2011, S. 33) eine Stichprobe aus drei RBS-Pfaden an den Probebäumen aus. Wie auch bereits bei den allometrischen Beziehungen zwischen Hilfs- und Zielgröße wird auch diese Beurteilung für die Schätzung der übrigen Zielgrößen angenommen. Bei einzelnen Bäumen, an denen nach der Durchführung der Optimierung einzelne Pfade keine Nutzungsvolumen aufweisen und damit keine Schätzung des Nutzungsvolumens ermöglichen, werden zur Schätzung des aufzuarbeitenden Holzvolumens die übrigen genutzten Pfade des Baumes verwendet. Die jeweilige Zielgröße berechnet sich dann aus dem arithmetischen Mittelwert der Einzelschätzungen der jeweiligen RBS-Pfade. Die Varianz für die hier als Erklärungsgrundlage verwendete Volumenschätzung aus i -Pfaden wird durch die unabhängig voneinander nach dem Verfahren „Ziehen mit Zurücklegen“ ausgewählten Pfade

wie folgt bestimmt (GAFFREY & SABOROWSKI 1999, S. 180; SABOROWSKI & GAFFREY 1999, S. 224)(Formel 25):

$$\text{Var}(\bar{\hat{V}}) = \frac{1}{n(n-1)} * \sum_{i=1}^n (\hat{V}_i - \bar{\hat{V}})^2 \quad \text{Formel 25}$$

5.2.3 RBS-Datensatz

Die RBS-Daten für diese Studie stammen aus zwei Quellen, wobei deren räumliche Ausdehnung sich über ganz Deutschland erstrecken. Zum einen stammen die Daten von der FVA Baden-Württemberg (FVA-B-W) in Freiburg, welche im Rahmen von zwei Fallstudien (KÄNDLER & BÖSCH 2009, S. 9) und im Zuge der dritten Bundeswaldinventur (BWI³) im Auftrag des damaligen Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) aufgenommen wurden. Die andere Datenquelle stellen Daten von der Nordwestdeutschen Forstlichen Versuchsanstalt (NW-FVA) dar, welche mit dem Projekt Möglichkeiten und Grenzen der Vollbaumnutzung wie die FVA Baden-Württemberg auf Basis des RBS-Verfahrens Schätzfunktionen für Dendromasse und Nährstoffgehalte in verschiedenen Baumkompartimenten erstellt hat. Insbesondere die Daten des BMELV sind mit dem Ziel aufgenommen worden, einen möglichst großen, bundesdeutschen Bereich abzudecken. Die Datenaufnahme wurde zwischen den Versuchsanstalten abgestimmt und in eine einheitliche Datenbankstruktur eingepflegt, sodass die für diese Studie relevanten Buchen ohne Weiteres aus den Datensätzen extrahiert und zusammen ausgewertet werden können (HUSMANN 2013, S. 9).

Die Auswahl der Bäume erfolgte mit dem Ziel, einen möglichst breiten BHD-Bereich (Gleichverteilung innerhalb der Klassen) und zudem möglichst unterschiedliche Standorte in unterschiedlichen Regionen (Wuchsbezirke) abzudecken. Dabei wurden keine Solitär- oder Randbäume ausgewählt, sondern nur Bäume innerhalb von in der forstlichen Nutzung befindlichen Rein- und Mischbeständen. Jeder aufgenommene Baum wurde zudem per GPS lokalisiert (BÖSCH 2010, S. 3ff; RUMPF et al. 2011, S. 27ff).

Die nach RUMPF et al. (2011, S. 34) und BÖSCH (2010, S. 3f) aufgenommenen Parameter an den Prohebäumen sind in Tabelle 9 aufgeführt. Die für das RBS-Verfahren relevanten Informationen wurden im liegenden Zustand aufgenommen und hierbei erfolgte zuerst eine Einteilung des Baumes in die drei Bereiche Baumstumpf, Stamm und Krone. Das Holzvolumen des Baumstumpfes wurde in Gegensatz zu den übrigen beiden Bereichen nicht erfasst. An jedem Untersuchungsobjekt sind jeweils drei Pfade – vom Stammfuß bis zur Kronenspitze hin – und entlang der Pfade die Segment-/Knotenlängen bzw. Astbasisdurchmesser der abgehenden Äste gemessen worden. Durch die Fällung zerstörte Pfade wurden an der Bruchstelle wieder rekonstruiert und entsprechend vermessen. Für weitere

Informationen bezüglich der aufgenommenen Parameter abseits des RBS-Verfahrens sei auf RUMPF et al. (2011, S. 34) und BÖSCH (2010, S. 3f) bzw. in zusammengefasster Form auf HUSMANN (2013, S. 11ff) verwiesen.

Tabelle 9: Erfasste Parameter an Laubbäumen (RUMPF et al. 2011, S. 34; erweitert um BÖSCH 2010).

Bereich des Baumes	Erfasste Parameter	Messung
Stock	Höhe [cm]	liegend (optional stehend)
	Durchmesser [mm]	liegend
	Alter [Jahre]	liegend
	Soziale Stellung	stehend
Stamm	$d_{0,5}, d_1, d_{1,3}, d_2, d_3, d_5, d_7, \dots, d_{\text{Kronenansatz}}$ [mm]	bis 2m stehend, sonst liegend
	Schaftlänge bis Kronenansatz [cm]	liegend
	Schaftlänge bis Beginn des Dürrastbereiches [cm]	liegend
	Gesamtlänge [cm]	liegend
Krone	RBS-Verfahren	liegend
	Kronenablotung	stehend

In Tabelle 10 ist die beschreibende Statistik aller drei Datenquellen aufgeführt. Insgesamt umfasst die Stichprobe 163 Buchen (= Einzelbäume). Den größten und damit aussagekräftigsten Datensatz stellen die BWI³-Daten dar (72,4 %). Insgesamt wird deutlich, dass alle drei Datensätze zusammen die gewünschte, breite Variabilität der Baumparameter bspw. im BHD-Bereich von 8,0 bis 78,3 cm oder im Altersbereich von 21 bis 160 Jahren aufweisen. Innerhalb der Gesamtdatenbank sind die Bäume der NW-FVA mit 45 bis 121 bzw. von 177 bis 179 durchnummeriert. Die FVA+BWI-Datenbank umschließt den Nummernbereich 121 bis 489 (mit Ausnahme der Nummer 177 bis 179). Da die Nummer 121 doppelt im Datensatz enthalten ist, wird diese zu 490 umgeschrieben (HUSMANN 2013, S. 12).

Tabelle 10: Übersicht über die mit dem RBS-Verfahren aufgenommenen Buchen getrennt nach Datenbankherkunft mit arithmetischem Mittelwert und Bereich des Durchmesser, der Höhe und des Alters (HUSMANN, S. 12).

Her- kunft	N	Mittl. BHD [cm]	BHD- Bereich [cm]	Mittl. Höhe [m]	Hö- henBe- reich [m]	Mittl. Alter [a]	Alters- Bereich [a]
NW- FVA	37	32,5	8,0-66,4	24,9	15,3- 35,3	84	21-180
FVA- B-W	8	27,0	16,5- 38,3	22,9	14,2- 28,3	73	50-100
BWI ³	118	36,8	12,2- 78,3	25,5	13,1- 38,5	85	25-160

5.3 Ökonomische Bewertung und Optimierung

Entsprechend den Ausführungen zur Modellkonzeption (vgl. Abbildung 20) bildet die ökonomische Bewertung der RBS-Pfade den ersten Schritt auf dem Weg zur Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität. Erst daran schließt sich der Optimierungsalgorithmus²⁹ (Kapitel 5.3.2) an. Im Gegensatz zum Optimierungsalgorithmus ist die ökonomische Bewertung der RBS-Pfade verfahrens-spezifisch.

5.3.1 Ökonomische Bewertung

Die ökonomische Bewertung erfolgt auf Basis des Grenzkostenansatzes und zielt darauf ab, den maximalen erntekostenfreien Erlös (EKFE) an den drei RBS-Pfaden des Einzelbaumes zu ermitteln. Dabei sind die Bewertungseinheiten die Knoten bzw. Segmente innerhalb der Pfade, sodass hierbei auch von einer stück-bezogenen³⁰ Deckungsbeitragsrechnung gesprochen werden kann. Der EKFE

²⁹ Ein Algorithmus ist ein methodisches Rechenverfahren, welches nach der Durchführung endlich vieler und eindeutig festgelegter Rechenoperationen zu einem Ergebnis gelangt (ENGESSER et al. 1988, S. 25ff).

³⁰ Zur besseren Verständlichkeit werden die Segmente und Knoten des RBS-Datensatzes hier als Stücke bezeichnet. In den folgenden Textpassagen werden je nach Notwendigkeit auch beide Stücktypen getrennt betrachtet, sodass in diesen Fällen die Bezeichnungen Segment und Knoten weiter aufgeführt werden.

wird dabei aus der Differenz zwischen dem i -ten Stückerlös E_{Stck} und den variablen i -ten Stückkosten für die Ernte ($K_{Stck,Ernte}$) bzw. die Rückung ($K_{Stck,Rückung}$) hergeleitet (Formel 26).

$$DB_{Stck,i} = E_{Stck,i} - K_{Stck,Ernte,i} - K_{Stck,Rückung,i} \quad \text{Formel 26}$$

Ausschlaggebend für die Höhe der Erlöse bzw. Kosten sind die bei der RBS-Aufnahme gemessenen Dimensionsinformationen (Länge, Astansatzdurchmesser, Zopfdurchmesser) der Segmente/Knoten (= Stücke).

Tabelle 11 gibt einen Überblick über den ökonomischen Bewertungsansatz für die hochmechanisierte Holzernte.

Tabelle 11: Ökonomische Bewertung der hochmechanisierten Holzernte.

	Beschreibung
Bewertungsgröße	Maximaler Erntekostenfreier Erlös
Bewertungseinheit	Knoten und Segmente
Erlösbestandteile	Einheitsholzpreis & Holzvolumen der Bewertungseinheit
Kostenbestandteile (Ernte)	Maschinenarbeitsstunde & spezifische Zeitverbräuche je Bewertungseinheit
➤ Knoten	Nur schnittrelevante Knoten; Längen- & schnittabhängige Zeitverbräuche
➤ Segmente	Alle Segmente; Längenabhängige Zeitverbräuche
Kostengrundlage (Rückung)	Einheitskostensatz & Holzvolumen der Bewertungseinheit

Die Bewertungsgröße ist dabei – wie bereits oben erwähnt – der maximale EKFE der Aufarbeitung.

Die Bewertungseinheiten sind die einzelnen Knoten und Segmente auf den jeweiligen RBS-Pfaden. Grundlegend für Trennung zwischen Knoten und Segmenten im Rahmen der ökonomischen Bewertung sind die Erkenntnisse aus der Prozesskostenanalyse bzw. der zugehörigen Zeitverbrauchsstudie (vgl. Kapitel 4.3). Eines der Kernergebnisse dieser Studie ist es, dass u.a. bedingt durch die Konstruktion und Vorschubgeschwindigkeit des Harvesteraggregates Äste mit einem Astbasisdurchmesser von über 7 cm m.R. (Schnittrelevante Verzweigungen, kurz: SRV; vgl. Kapitel 4.3.1) nicht mehr mit den Entastungsmessern abgeschlagen werden können und daher ein zusätzlicher Trennschnitt nötig ist. Für die Aufarbeitung einer SRV werden nach der Fallstudie 24,22 Sekunden [Sek/Stck]

mehr verbraucht. Alle anderen, geringer dimensionierten Äste werden durch die Entastungsmesser abgeschlagen und beeinflussen die Aufarbeitungszeit nur marginal. Ein weiteres Ergebnis der Prozesskostenanalyse ist die Abhängigkeit des Zeitverbrauchs von der Stücklänge. Entsprechend den Ergebnissen der Prozesskostenanalyse werden daher 1,9 Sekunden für ein Meterstück [Sek/m] veranschlagt. Beide Ergebnisse aus der Prozesskostenanalyse werden in der ökonomischen Bewertung der hochmechanisierten Aufarbeitung berücksichtigt. Entsprechend werden die Knoten innerhalb der Pfade mit einer oder mehreren SRV mit dem entsprechenden Zeitaufschlag für die Aufarbeitung der SRV versehen. Zusätzlich werden alle Knoten und alle Segmente entsprechend ihrer Länge mit dem zugehörigen Zeitverbrauch veranschlagt. Die ökonomische Bewertung des Zeitverbrauchs erfolgt anschließend über einen zu wählenden Maschinenkostensatz [EUR/MAS]. Die Kosten in Folge von SRV haben somit einen Fixkostencharakter, da sie bei allen Knoten mit mehr als einer SRV auftreten.

Die Erlösberechnung und die Kostenberechnung der Holzrückung erfolgt einheitlich über einen Einheitsholzpreis bzw. –kostensatz und das jeweilige Holzvolumen des Segments bzw. Knotens.

5.3.2 Optimierungsalgorithmus

Die Entscheidungsvariablen für den Optimierungsalgorithmus sind die in der Tabelle 11 aufgeführten Bewertungseinheiten (Knoten und Segmente) auf dem RBS-Pfad. Durch Nutzung bzw. Nicht-Nutzung (= Aufarbeitungsentscheidung) der jeweiligen Bewertungseinheiten kann derjenige Bereich am Pfad bestimmt werden, welcher den maximalen EKFE bzw. das ökonomische Optimum darstellt. Die Schwierigkeit in der Programmierung des Algorithmus liegt weniger in den Restriktionen begründet, welche vorwiegend technischer Natur sind und vornehmlich aus der Art und Weise der RBS-Informationen in dem RBS-Datensatz wie bspw. den Astdurchmessersprüngen zwischen den Segmenten bzw. Knoten (= diskrete Abholzigkeit) oder die ungleiche Segment-/Knotenlänge resultieren (wobei der Optimierungsalgorithmus alle vorhandenen Restriktionen berücksichtigt). Viel eher bestehen die Schwierigkeiten in den Sprungkosten und damit in den diskreten Kostenfunktionen, welche bei der hochmechanisierten Holzernte die Bestimmung des ökonomischen Optimums erschwert (vgl. Kapitel 3.6).

Der Optimierungsalgorithmus arbeitet rekursiv und ist durch wiederholende Rechenabläufe in der Lage, diskrete Kostenfunktionen abzuarbeiten. Entsprechend dem rückwärts gerichteten Rechenweg beginnt der Optimierungsalgorithmus bei dem letzten Segment des jeweiligen RBS-Pfades und arbeitet sich von diesem ausgehend zu dem Knoten, welcher den Kronenansatz dargestellt, vor (Abbildung 24; Legende s. Anhang 5). Hierbei trifft der Optimierungsalgorithmus die Entscheidung über Nutzung (weißes Kästchen) bzw. Nicht-Nutzung (graues

Kästchen) des jeweiligen Pfadbereiches. Es handelt sich somit um eine binäre Entscheidung.

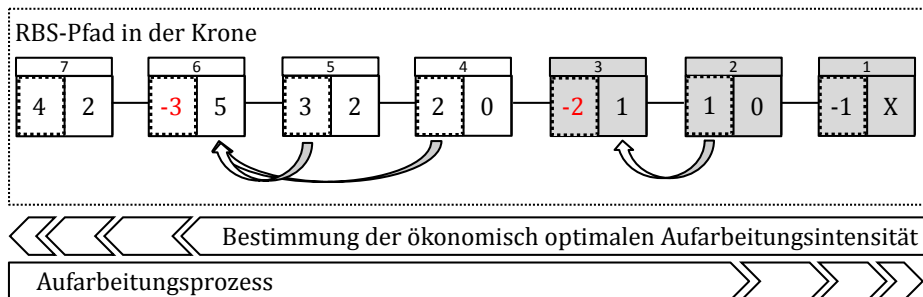


Abbildung 24: Darstellung der rekursiven Rechenweise des Optimierungsalgorithmus.

Eine weitere Optimierungsproblematik (vgl. Abbildung 9³¹) besteht darin, dass auch die Aufarbeitung von auf dem Pfad befindlichen Bereichen mit einem negativen Deckungsbeitrag hinsichtlich der Maximierung des Pfad-Deckungsbeitrages vorteilhaft sein kann. Dies ist im Rechenschritt 6 (Abbildung 24) der Fall, welcher selbst einen Deckungsbeitrag von -3 GE erzeugt (rot, linkes Kästchen). Der Optimierungsalgorithmus prüft in diesem Fall in einem vorwärts gerichteten Prozess und in dem direkt anschließenden Bereich (Rechenschritt 5 und 4), ob die Summe der Deckungsbeiträge (5 GE, rechtes Kästchen) den negative Deckungsbeitrag in Rechenschritt 6 (-3 GE) aufwiegt. Ist dies der Fall, so führt die positive Aufarbeitungsentscheidung zu einem höheren Deckungsbeitrag am Pfad. Sollte der Deckungsbeitrag des anschließenden Pfad-Bereichs nicht die notwendige Höhe erreichen (Rechenschritt 3), so ist die Aufarbeitung nicht ökonomisch vorteilhaft bzw. diese Pfadbereiche werden nicht aufgearbeitet (ausgegraute Kästchen). Das ökonomisch optimale Kronennutzungsvolumen bzw. damit letzten Endes auch die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität wird nur über den Bereich des RBS-Pfades mit positiven Nutzungsentscheidungen (weiße Kästchen) berechnet.

Die Programmierung des Optimierungsalgorithmus wird über mehrere ineinander verschachtelte Schleifen im R-Code umgesetzt. Sie basieren in ihrer Programmierungsstruktur auf der Arbeit von HUSMANN (2013, S. 33) mit den Änderungen hinsichtlich der ökonomischen Bewertung³². Die Einzelergebnisse der drei

³¹ Im Gegensatz zu der in Abbildung 9 dargestellten Kronenverzweigung (sukzessive Verästelung des Stammes in einzelne Äste) erfolgt die Optimierung auf den RBS-Pfaden, welche sich selbst nicht verzweigen. Auf die Kronenverzweigung kann durch die Knoten auf dem RBS-Pfad zurückgeschlossen werden. Zur Verdeutlichung dieser Unterschiede bzw. der speziellen Umsetzung auf dem RBS-Pfad wird daher an dieser Stelle diese Thematik (z. T. synonym mit Kapitel 3.6) nochmals erklärt.

³² Husmann (2013, S. 33 ff) bewertete die motormanuelle Holzernte.

RBS-Pfade werden zum Schluss auf Einzelbaumebene gemittelt. Die Ausgabebetten nach Durchführung der Optimierung enthalten für jeden Einzelbaum folgende Kennzahlen:

- Ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität
- Ökonomisch optimaler Grenzzopf [mm]
- Nutzungsanteil des RBS-Pfadvolumens
- Ökonomisch optimal aufzuarbeitendes Kronenholzvolumen [Fm o.R.] und deren Standardabweichung
- Kronenrestholz [Fm o.R.] und deren Standardabweichung
- Ökonomisch optimal aufzuarbeitendes Baumholzvolumen [Fm o.R.] und deren Standardabweichung
- Gesamtkosten, -erlös und EKFE des Untersuchungsobjektes [EUR/Baum] bzw. der Krone [EUR/Krone]
- Durchschnittskosten und durchschnittlicher EKFE [EUR/Fm o.R.]

5.4 Klassifikation von Kronentypen

Mit steigendem Baumalter entwickeln Buchen beeinflusst von dem genetisch fixierten Verzweigungssystem und verschiedensten Umwelteinflüssen unterschiedliche Kronenformen (vgl. Kapitel 2.1; opportunistisches Modell), welche sich nach HENGST (1964, S. 79f) in zwieselförmige, besenförmige oder wipfelschäftige Kronentypen eingruppiieren lassen. Diese Kronentypen zeichnen sich u.a. durch eine unterschiedlich frühe Verzweigung am Stamm und im weiteren Kronenbereich aus. In Anbetracht des in Kapitel 3.3.2 vorgestellten Stückmassegesetzes, wonach die Aufarbeitung eines Festmeters Rohholz mit gering dimensionierten Sortimentstücken einen überproportional höheren Zeitverbrauch gegenüber stärker dimensionierten Stücken verursacht, sollten daher stärker verzweigende Kronentypen, die dann auch einen größeren Anteil dünnerer Äste besitzen, zu einem höheren Produktionsfaktorverbrauch und damit zu höheren Aufarbeitungskosten führen (vgl. GUGLHÖR 1994, S. 697). Folglich ist davon auszugehen, dass auch die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität abhängig von der Verzweigung bzw. den Kronentypen ist, auch wenn eine Darstellung der Beziehung dieser Größen sich bisher in der Literatur nicht finden lässt. Um den Zusammenhang zwischen der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität und dem Kronentyp zu quantifizieren, wird über die RBS-Daten eine Kronenklassifikation vorgenommen, welche spätere regressionsanalytische Analysen erlauben soll. Wichtig ist es dabei zu verstehen, dass eine direkte Umsetzung der Kronentypen nach HENGST (1964) in Form von RBS-Kronentypen grundsätzlich nicht möglich ist, da zum einen die Abgangswinkel nicht über das RBS-Verfahren abgebildet werden können und zum anderen die Klassifikation nach HENGST (1964) vornehmlich visuell, ohne quantitative Kroneninformationen erfolgt. Insofern handelt es sich bei der im

Folgenden kurz dargestellten Kronenklassifikation um ein anderes methodisches Vorgehen, welches auf den RBS-Informationen basiert.

Auf Grund der oben skizzierten ökonomischen Zusammenhänge ist es ziel führend, die Kronenklassifikation auf der Basis der Kronenastdurchmesser durchzuführen. Idealer Weise ist die Kronenklassifikation auf jeden BHD übertragbar bzw. es werden gleichzeitig Informationen über die Kronennutzungsvolumen bis auf einem definierten Astdurchmesser bereitgestellt. Solch eine Form der Kronenklassifikation wurde im Rahmen der Masterarbeit von HUSMANN (2013) erstellt, welche von dem Autor der Dissertationsschrift betreut wurde.

HUSMANN (2013, S. 59ff) teilte die 163 mit dem RBS-Verfahren aufgenommenen Buchen hinsichtlich ihrer Kronenmorphologie in drei Kronentypen (Typ 1 bis 3) ein. Die Clusterung erfolgte dabei auf Basis des normierten mittleren Kronenastdurchmessers sowie des normierten unteren und oberen Quantils der Kronenastdurchmesser³³. Diese drei normierten Lagemaße, welche aus der kumulierten Holzvolumenverteilungsfunktion über den Kronenastdurchmesser der Einzelbäume abgeleitet worden sind, beschreiben die Verteilung der Astdurchmesserdimensionen und damit die Kronenstruktur besonders gut. Im Ergebnis werden 50 Bäume dem Typ 1, bei dem ein besonders großer Anteil des Kronenholzvolumens in geringeren Astdimensionen aggregiert ist, zugeordnet. 25 % bzw. 44 Bäume können dem Typ 3 beigeordnet werden, bei welchem sich ein großer Anteil des Kronenholzvolumens in stärkeren Astdimensionen befindet. Kronen des Typs 2 (69 Bäume bzw. 40 %) weisen einen mittleren Astdurchmesserverlauf in der Krone auf (Tabelle 12).

Tabelle 12: Ausstattung der BHD-Klassen [cm] mit denen nach dem Verfahren von HUSMANN (2013, S. 59ff) klassifizierten Buchenkronentypen.

	Anzahl		BHD-Klasse [cm]						
	n	0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	>70
Kronentyp 1	50	-	9	11	8	14	4	3	1
Kronentyp 2	69	1	7	12	20	11	8	7	3
Kronentyp 3	44	2	15	11	8	3	3	2	-

³³ Die Normierung (0 bis 1) erfolgte anhand des Astdurchmesserverhältnisses von der Terminalknospe (1 cm) und dem baumindividuellen Kronenastdurchmesser.

Abbildung 25 zeigt – aufgetragen in 10 %-Holzvolumenperzentile – die normierten Astdurchmesserverteilungen aller Einzelbäume getrennt nach den drei aus der Clusterung hervorgegangenen Kronentypen (HUSMANN, 2013, S. 65). Jedes Perzentil umfasst alle 163 Einzelbäume (horizontalen Schichten). Die Streuung innerhalb der Perzentile ist relativ weit, diese ist bei 50 - 70 % am größten bzw. bei 10 sowie 90 % am geringsten. Die drei Regressionen sind Polynome dritten Grades und stellen den mittleren Verlauf der relativen Astdurchmesser jedes einzelnen Kronentyps dar (Formel 27 bis Formel 29). Der relative Astdurchmesser (d_{rel}) von 1 ist gleich zu setzen mit dem Kronenansatzdurchmesser, da dieser normalhin auch der stärkste Astdurchmesser in der Krone ist. Alle anderen relativen Astdurchmesser ergeben sich als Anteil vom stärksten Astdurchmesser. Von diesem stärksten Astdurchmesser ausgehend befinden sich somit 100% des Kronenvolumens in dünneren Astdimensionen, wobei das Kronenvolumen in Abhängigkeit vom Kronentyp unterschiedliche räumliche Verteilungen aufweist. Bäume mit dem Kronentyp 1 (rot) zeigen einen eher progressiven Verteilungsverlauf auf, was auf einen größeren Anteil des Kronenholzes in dünneren Astdurchmesser hindeutet. Demgegenüber zeigen die Kronen des Typs 3 einen degressiven Verlauf auf, das Kronenholz ist hier vorwiegend in stärkeren Astdimensionen vorhanden. Einen beinahe linearen und damit einen mittleren Verlauf zeigt der Kronentyp 2 auf. Insgesamt ergeben sich Überschneidungen zwischen den Kronentypen, insbesondere der Kronentyp 2 findet sich in den beiden anderen Kronentypbereichen wieder.

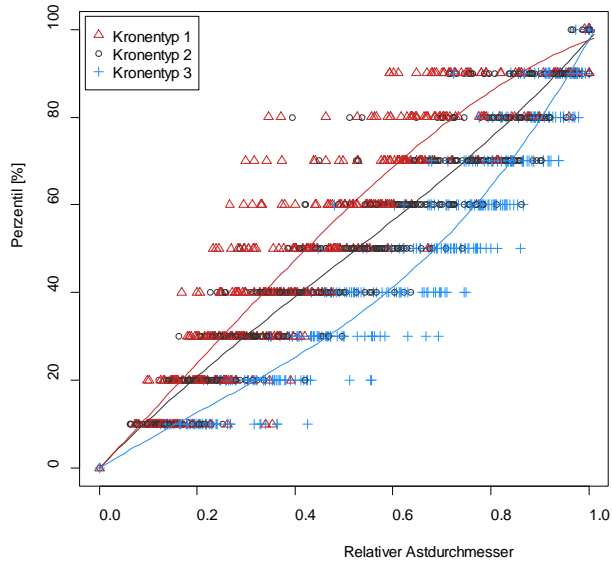


Abbildung 25: 10 %-Perzentile der relativen kumulierten Astdurchmesser nach Kronentypen geclustert inkl. polynomialischer Regression für jeden Kronentyp (HUSMANN, 2013, S. 65).

$$PK_{K1} = -0,3601 * d_{rel}^3 + 0,1533 * d_{rel}^2 + 1,1817 * d_{rel} \quad \text{Formel 27}$$

$$PK_{K2} = 0,4403 * d_{rel}^3 - 0,6161 * d_{rel}^2 + 1,1523 * d_{rel} \quad \text{Formel 28}$$

$$PK_{K3} = 0,7351 * d_{rel}^3 - 0,4557 * d_{rel}^2 + 0,69069 * d_{rel} \quad \text{Formel 29}$$

Auf Basis dieser Astdurchmesserverteilungsfunktionen (Formel 27 bis Formel 29) können somit unabhängig vom BHD des Baumes und bei Kenntnis des Kronenansatzdurchmessers für jeden beliebigen Kronenastdurchmesser die Holzvolumen oberhalb und unterhalb geschätzt werden. Für weitere Informationen sei auf HUSMANN (2013, S. 47f) verwiesen.

Neben den Durchmessern der Kronenäste sind für die Aufarbeitung insbesondere die Anzahl und Aststärken der Verzweigungen relevant. Auf der Abbildung 27 sind die über das RBS-Verfahren hochgerechneten, in der gesamten Krone auftretenden Verzweigungen dargestellt (vgl. HUSMANN 2013, S. 60ff.). Hierbei weisen Kronen des Typs 1 gegenüber Typ 3 eine tendenziell höhere Anzahl an Verzweigungen auf. Die Streuung der Verzweigungsanzahlen ist dabei insgesamt und innerhalb der Kronentypen relativ stark, und streut bspw. bei einem BHD von 40 cm von 177 bis 1608 Verzweigungen.

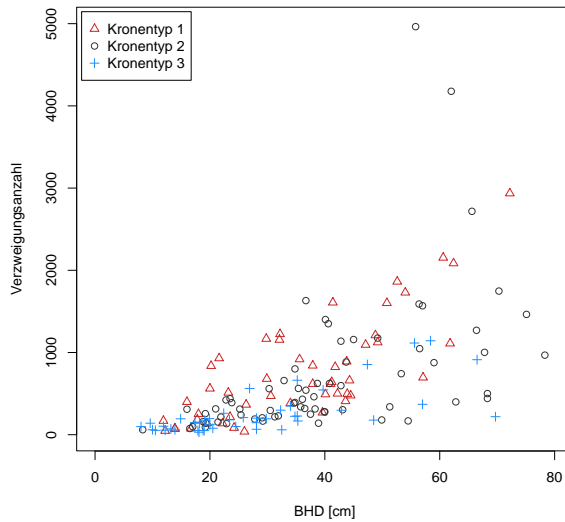


Abbildung 26: Verzweigungsanzahl getrennt nach Kronentypen aufgetragen über BHD.

Enger und in geringen Anzahlen hingegen ist die Verteilung bei schnittrelevanten Verzweigungen (SRV), welche bei der hochmechanisierten Holzernte durch die Verursachung von Sprungkosten eine große Rolle spielen (Abbildung 27). Bei einer SRV zweigen am RBS-Knoten mindestens zwei Äste mit einem Basisdurchmesser größer als 7 cm ab. Ein Unterschied zwischen den Kronentypen ist nicht mehr auszumachen.

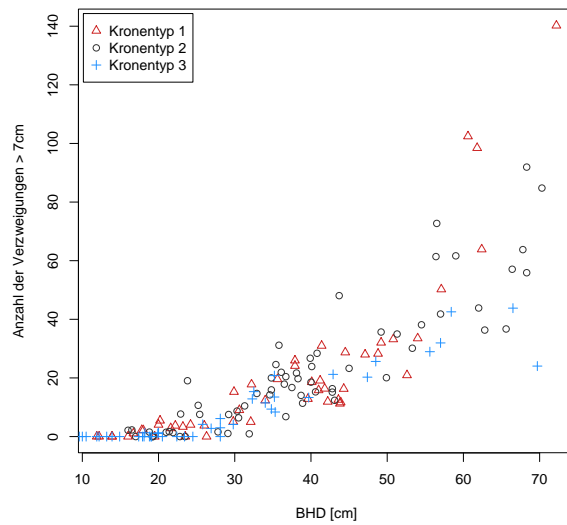


Abbildung 27: Anzahl der Verzweigungen mit mindestens zwei Ästen größer 7 cm getrennt nach Kronentypen aufgetragen über BHD.

6 Kalkulationsergebnisse des Entscheidungsmodells

In diesem Kapitel werden die Hauptergebnisse der Modellkalkulation vorgestellt. Dazu werden zuerst die Kalkulationsgrundlagen der Basisvariante, welche die zum Zeitpunkt der Verfassung der Dissertationsschrift vorherrschenden Kosten-Erlös-Verhältnisse im südlichen Niedersachsen abbildet, vorgestellt. Auf dieser Basisvariante basieren die Ergebnisse in den Kapiteln 6.2 bis 6.4. In diesen Kapiteln werden über den Einzelbaum zum Kollektiv hin Ergebnisse rund um die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität vorgestellt.

Im Rahmen des Variantenstudiums (Kapitel 6.5) werden die Inputdaten der Basisvariante variiert, sodass anhand eines Regressionsmodells die Auswirkungen veränderter Kosten-Erlös-Verhältnisse auf die Modellergebnisse (Sensitivität) aufgezeigt werden können.

6.1 Kalkulationsgrundlagen der Basisvariante

Für die Basisvariante werden die zum Zeitpunkt der Verfassung der Dissertationsschrift im südniedersächsischen Raum vorherrschenden Kosten-Erlös-Verhältnisse verwendet (Tabelle 13).

Der in der Basisvariante verwendete Holzerlös bezieht sich auf das Sortiment Buchen-Industrieholz bzw. Buchen-Scheitholz und wird als Erlös frei Waldweg verstanden. Die Höhe orientiert sich am durchschnittlich erzielbaren Holzpreis für jene Sortimente im Süd-Niedersächsischen Raum im Jahr 2012 (BEITZEN-HEINEKE 2012).

Die Kosten für die hochmechanisierte Ernte orientieren sich an den aktuell für die Regieerntemaschinen des Maschinenstützpunktes Seesen der Niedersächsischen Landesforsten zu kalkulierenden Maschinenkostensatz (BIENECK 2013b).

Der Kostensatz für die Holzrückung wiederum folgt den Empfehlungen der AFL (2012, S. 181) und ist als Mittelwert aus der Rückung von Industrieholz mit dem Forwarder zwischen dem Niedersächsischen Berg- und Flachland zu verstehen. Die Umsatzsteuer wird in den Preisen und Kosten nicht berücksichtigt.

Tabelle 13: Kalkulationsgrundlagen der Basisvariante (ohne Umsatzsteuer)

Holzerlös	50,00 EUR/Fm
Erntekosten	175,00 EUR/MAS
Rückekosten	8,65 EUR/Fm

Von den Kronen der 163 RBS-Einzelbäume werden nach der Optimierung mit oben angeführten Inputdaten der Basisvariante in der hochmechanisierten Holzernte 13 % komplett nicht genutzt (Tabelle 14). Die nicht genutzten Kronen sind vorwiegend den geringen BHD-Klassen zuzuordnen, wobei auch eine Krone in der 4. BHD-Klasse vollständig aus der Nutzung fällt. Insgesamt ist zu erkennen, dass trotz des hohen Mechanisierungsgrades in der hochmechanisierten Holzernte und deren vornehmlichen Einsatzoptimum in den geringen Baumdimensionen auch Kronen in der ersten bis dritten BHD-Klasse nicht genutzt werden.

Tabelle 14: Anzahl der RBS-Untersuchungsobjekte [n] ohne Kronennutzung in Abhängigkeit zur BHD-Klasse [10 cm]

	Anzahl n	BHD-Klasse [cm]							
		0-9	10-19	20-29	30-39	40-49	50-59	60-69	>70
Ungenutzte Krone	21	1	5	9	5	1	-	-	-
Klassengröße	163	3	31	34	36	28	15	12	4

6.2 Erfüllung der Optimalitätsbedingung am Einzelbaum

Der maximale EKFE ist bei der Aufarbeitung eines Baumes dann erreicht, wenn die Grenzkosten gleich den Grenzerlösen sind bzw. eine Ausweitung der Aufarbeitung keinen zusätzlichen Grenzgewinn erwarten lässt (vgl. Kapitel 3.4). Auf

Einzelbaumebene lässt sich diese Optimalitätsbedingung am besten in Abhängigkeit vom Durchmesser des Grenzzapfes darstellen, da dieser ökonomisch optimale Aufarbeitungszopf die einzig operational verwendbare Größe bei der Aufarbeitung ist und über diesen gleichzeitig Rückschlüsse auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität gezogen werden können.

Zur besseren Verständlichkeit wird der Verlauf der Grenzkosten und -erlöse bzw. EKFE (an den RBS-Pfaden) über den gesamten Baum und nicht nur an den Buchenkronen dargestellt. Die Erfüllung der Optimalitätsbedingung ist so am besten nachzuvollziehen (Abbildung 28).

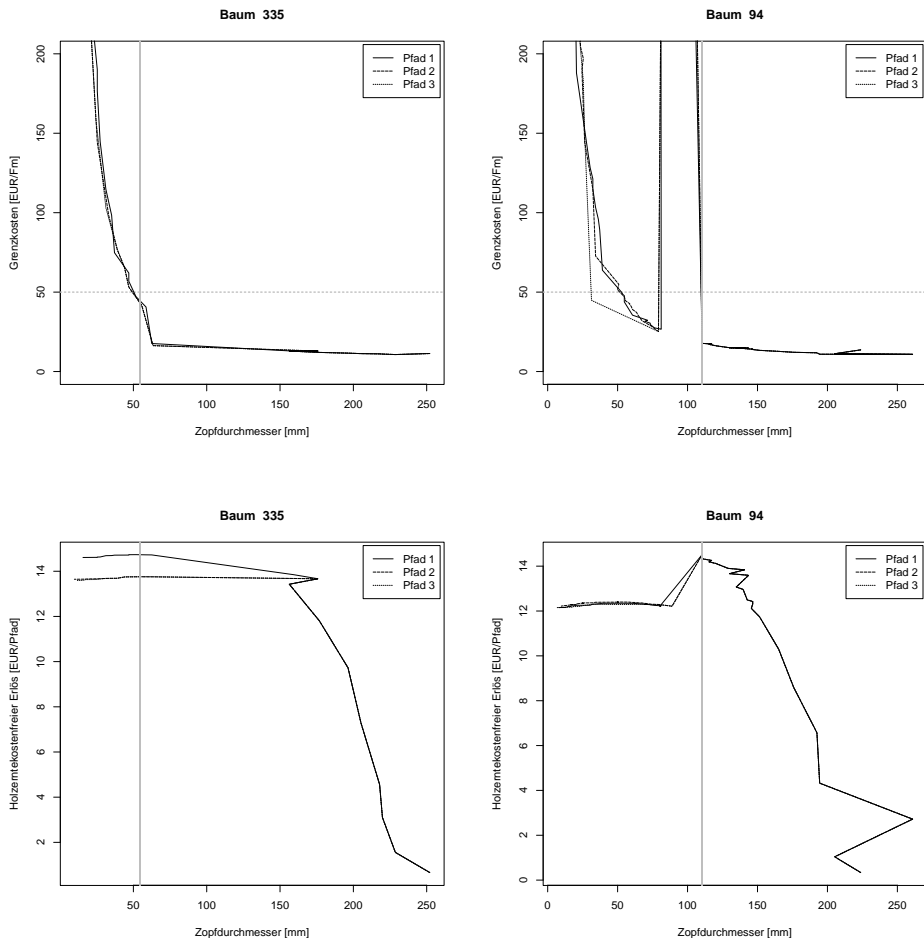


Abbildung 28: Verlauf der Grenzkosten [EUR/Fm] (oben) und des holzernstekostenfreien Erlöses [EUR/Pfad] (unten) über den Zapfdurchmessern der drei RBS-Pfade für die Bäume 335 und 94 nach hochmechanisierter Aufarbeitung. Hervorhebung des ökonomisch optimalen Grenzzapfes (vertikale Linie) bei einem Holzpreis von 50 EUR/Fm (horizontale Linie).

Wie in dem Kapitel 2.2 erwähnt, ist die hochmechanisierte Holzernte prädestiniert für schwächere Baumdimensionen. Entsprechend zeigt die Abbildung 28 (oben) den Verlauf der Grenzkosten [EUR/Fm] über den RBS-Segment/Knoten-Zopfdurchmessern [mm] getrennt für die drei RBS-Pfade und die zwei gering dimensionierten Einzelbäume mit den Nummern 335 und 94 (BHD von 23,5 bzw. 26,9 cm). Bei beiden Einzelbäumen steigen die Grenzkosten von einem Zopfdurchmesser von unter 100 mm ausgehend exponentiell an. Bei den RBS-Pfaden am Baum 335 (Abbildung 28 oben links) treten keine SRV auf, wodurch im Gegensatz zu Baum 94 (Abbildung 28 oben rechts) der Verlauf der Grenzkosten keinerlei Sprünge aufweist. Die Grenzkosten des Einzelbaumes 335 steigen somit stetig an. Tritt jedoch eine SRV auf, kommt es bedingt durch den zusätzlichen Zeitverbrauch für die Auftrennung der SRV zu einem sprunghaften Anstieg (Sprungkosten) und anschließend wieder zu einem starken Einbruch der Grenzkosten. Bei Baum 94 steigen diese Grenzkosten dabei auf weit über 200 EUR/Fm und überschreiten damit den Grenzerlös deutlich³⁴. Der ökonomisch optimale Grenzzopf (vertikale grau gestrichelte Linie) zeichnet sich durch das Maximum des EKFE und durch die Gleichheit von Grenzkosten und Grenzerlös (horizontale grau gestrichelte Linie) aus (vgl. Kapitel 3.4). Bedingt durch den sprunghaften Anstieg der Grenzkosten bei Baum 94 findet sich das Maximum des EKFE vor dem Kostenanstieg (Abbildung 28 unten rechts) und somit liegt der ökonomisch optimale Grenzzopf bereits bei einem Durchmesser von 110 mm. Demgegenüber liegt der ökonomisch optimale Grenzzopf bzw. das Maximum des EKFE bei Baum 335 und ohne ein Auftreten einer SRV bei einem Segmentzopfdurchmesser von 54 mm (Abbildung 28 unten links). Auch hier endet die Aufarbeitung vor denjenigen Segmenten/Knoten, welche negative Deckungsbeiträge erwarten lassen.

Die Optimalitätsbedingung kann somit auf Einzelbaumebene als erfüllt angesehen werden. Die in den folgenden Kapiteln vorstellten Ergebnisse beziehen sich jeweils auf die gesamte RBS-Stichprobe und basieren letztlich auf den ökonomisch optimalen (Teil-)Ergebnissen jedes Einzelbaumes.

³⁴ Der Deckungsbeitrag des Knotens mit der SRV besitzt eine Höhe von -2,30 EUR/Stck wird durch die summierten positiven Deckungsbeiträge der Folgeknoten/-segmente (Pfad 1: 0,14 EUR; Pfad 2: 0,18 EUR; Pfad 3: 0,08 EUR) nicht aufgewogen.

6.3 Ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität

Die Aufarbeitungsintensität bezieht sich (im Gegensatz zum vorherigen Kapitel) nur auf das Kronenholzvolumen. Dazu wird sowohl das ökonomisch optimal nutzbare Kronenholzvolumen als auch das Kronenholzpotential über das repräsentative Pfadholzvolumen³⁵ geschätzt. Die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität stellt den aus Sicht eines Gewinn maximierenden Entscheiders ökonomisch optimal nutzbaren Kronenholzanteil des gesamten Kronenholzpotentials dar.

Abbildung 29 zeigt für die RBS-Bäume die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität (von Buchenkronen; kurz: AI) für die hochmechanisierte Aufarbeitung (kurz: HM) in Abhängigkeit vom BHD und getrennt nach Kronentypen (kurz: KRT).

Bei der hochmechanisierten Kronenaufarbeitung zeigt sich entsprechend den Ergebnissen der Zeitverbrauchsanteile in der Prozesskostenanalyse (vgl. Kapitel 4.3.3) kein statistischer Zusammenhang zwischen der Aufarbeitungsintensität in der Krone und dem BHD. Die ökonomische optimale Aufarbeitungsintensität streut über die gesamte BHD-Bandbreite zwischen Null und 93 %, wobei bis auf 8 Untersuchungsobjekte die Aufarbeitungsintensität unter 80 % liegt. Im Durchschnitt (Mean; Formel 30 bis Formel 32) der Kronentypen weist der Kronentyp 3 mit einem Anteil von 0,56 die höchste Aufarbeitungsintensität in der Krone auf und liegt damit rd. 50 % über dem Kronentyp 2 bzw. rd. 80 % über dem Kronentyp 1.

Insgesamt ist zu erkennen, dass die Aufarbeitungsintensität der Kronen durch die ökonomischen Faktoren determiniert wird, sodass eine vollständige Aufarbeitung des Kronenholzes aus ökonomischer Sicht nicht vorteilhaft ist.

³⁵ Die einzelnen RBS-Knoten bzw. -Segmente werden hierzu durch die individuelle bedingte Auswahlwahrscheinlichkeit dividiert, wodurch deren Holzvolumen nun einen Volumenanteil des „realen“ Kronenholzvolumens repräsentiert (Vgl. Kapitel 1.4 und 5.2.2).

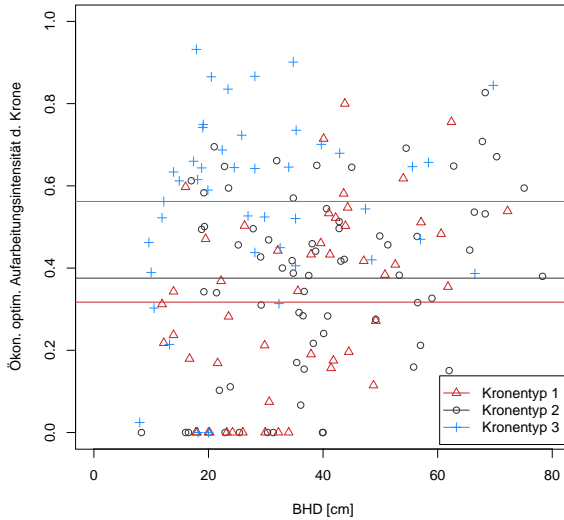


Abbildung 29: Ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität (AI) der Buchenkronen für die hochmechanisierte Aufarbeitung (HM) in Abhängigkeit von dem BHD und getrennt nach den Kronentypen (KRT).

$$AI_{KRT\ 1, HM} = 0,32 \quad \text{Formel 30}$$

$$AI_{KRT\ 2, HM} = 0,38 \quad \text{Formel 31}$$

$$AI_{KRT\ 3, HM} = 0,56 \quad \text{Formel 32}$$

Entsprechend den Ergebnissen der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität streuen die nutzbaren Kronenholzvolumen (unter ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) vergleichsweise stark (Abbildung 30). Hierbei sind die nutzbaren Kronenholzvolumen bis zu einem BHD von 40 cm über alle Kronentypen relativ ähnlich, erst ab einem BHD von 40 cm steigen die nutzbaren Kronenholzvolumen der Kronentypen 1 und 2 deutlich weniger stark an als bei dem Kronentyp 3. Als Funktionstyp wurde eine Exponentialfunktion gewählt, welche mit der Regressionsmethode *Standardised Mayor Axis* (SMA) (R-Paket *smatr*) (WARTON ET AL. 2012) angepasst wurde. Wie bereits in Kapitel 4.3.3 und Kapitel 5.2.1 beschrieben erfolgt die Parameterschätzung (Intercept= $\ln(\beta)$; Steigung= α) mit Hilfe einer simulierten, linearen Hauptachse (Residuenachse) im doppelt logarithmierten Raum (vgl. HUSMANN 2013, S. 53). Eine Bedingung für die Anwendung der Regressionsmethode ist die Homogenität der Varianz, welche bei dem ökonomisch

optimal nutzbaren Kronenholzvolumen in der hochmechanisierten Holzernte stark ausgeprägt ist (vgl. Anhang 6). Um eine Vergleichbarkeit der Regressionen in dieser Dissertationsschrift zu gewährleisten, wird in diesem und allen folgenden Fällen die Regressionsmethode SMA verwendet.

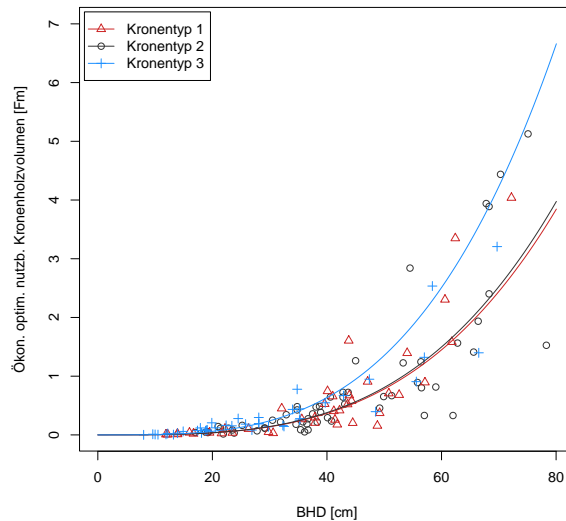


Abbildung 30: Ökonomisch optimal nutzbares Kronenholzvolumen (KHV) in Abhängigkeit vom BHD getrennt nach den Kronentypen (KRT) und für die hochmechanisierte Aufarbeitung (zugehörig Formel 33 bis Formel 35).

$$\text{KHV}_{\text{KRT } 1, \text{HM}} = e^{-13,495 + \ln(\text{BHD}) * 3,387} * 1,015 \quad R^2 = 0,86; \quad \text{Formel 33}$$

$p < 2,22 * 10^{-16}$

$$\text{KHV}_{\text{KRT } 2, \text{HM}} = e^{-13,462 + \ln(\text{BHD}) * 3,387} * 1,015 \quad R^2 = 0,79; \quad \text{Formel 34}$$

$p < 2,22 * 10^{-16}$

$$\text{KHV}_{\text{KRT } 3, \text{HM}} = e^{-12,946 + \ln(\text{BHD}) * 3,387} * 1,015 \quad R^2 = 0,87; \quad \text{Formel 35}$$

$p < 2,22 * 10^{-16}$

Der Likelihood-Quotienten-Test (LRS) bzw. der Wald-Test gehören zu der Gruppe der Hypothesentests und anhand dieser beiden Tests werden die Unterschiede der Steigung bzw. des Intercepts der Residuenachse (im doppelt logarithmierten Raum) zwischen Klassen (bspw. Kronentypen) auf Signifikanz hin überprüft. Der Unterschied des ökonomisch nutzbaren Kronenholzvolumens beträgt zwischen Kronentyp 1 und 2 rd. 2 %, zwischen Kronentyp 2 und 3 jedoch rd. 40 % (jeweils im Vergleich zum Kronentyp 2). Bei den Ergebnissen der Signifi-

kantztests zeigt sich, dass bei der hochmechanisierten Holzernte ein signifikanter Unterschied in dem Intercept (bei doppelt logarithmierter Skalierung) zwischen den Kronentypen besteht (Wald-Test: $p=0,0002$). Dieser ist im Gegensatz zur Steigung eine BHD-unabhängige Größe und hängt damit rein vom Kronentyp ab. Somit hat der Kronentyp bei der hochmechanisierten Holzernte einen signifikanten Einfluss auf das ökonomisch optimal nutzbare Kronenholzvolumen (Formel 33 bis Formel 35).

6.3.1 Ergebnisvalidierung

Im Rahmen der Prozesskostenanalyse (Kapitel 4) wurden bei einer Unterstichprobe von 101 Bäumen (vgl. Tabelle 3) sämtliche angefallenen Sortimente aufgemessen (vgl. Tabelle 4). Dieser empirische Datensatz wird nun dafür genutzt, eine Validierung der (auf dem RBS-Datensatz basierenden und ökonomisch optimalen) Modellergebnisse für die hochmechanisierte Holzernte vorzunehmen.

Bei der Unterstichprobe wurden an den Einzelbäumen vor der Fällung ebenfalls die Kronentypen aufgenommen, jedoch ist ein Vergleich der Nutzungsvolumen bzw. Aufarbeitungsintensitäten auf der Ebene der Kronentypen auf Grund des geringen Stichprobenumfangs ($n=101$) nicht ratsam. Daher erfolgt der Vergleich zwischen den nutzbaren Holzvolumen der empirischen Daten mit denen des Entscheidungsmodells ohne Berücksichtigung der Kronentypen. Zudem bezieht sich der Vergleich auf die nutzbaren Holzvolumen bzw. Aufarbeitungsintensitäten des gesamten Baumes und nicht wie im Kapitel 6.3 nur auf die Buchenkrone. Der Grund ist in dem empirischen Datensatz zu finden und liegt in der ungenauen Zuordnung von ausgehaltenen Fixlängen (3 m) in den Stamm- oder Kronenbereich, welche durch ihre Länge zumindest teilweise in den jeweiligen Bereich hineinragen. Hierdurch kann es bei Beibehaltung der (Stamm- bzw. Kronen-) Zuordnung zu Unter- und Überschätzungen des nutzbaren Kronenholzvolumens in unbekannter Höhe kommen, sodass sich die Zusammenführung des nutzbaren Stamm- und Kronenholzvolumens zum nutzbaren Einzelbaumholzvolumen empfiehlt. Weiterhin ist auch das Vollbaumvolumen der Einzelbäume der empirischen Daten nicht bekannt, sodass sich ohne Rückgriff auf Schätzfunktionen für das Vollbaumvolumen keine Aufarbeitungsintensitäten berechnen lassen. Zur Vollbaumvolumenschätzung wird deswegen auf die Funktion nach HUSMANN (2013, S. 57) zurückgegriffen.

In der Abbildung 31 sind die nutzbaren Einzelbaumholzvolumen aus den empirischen Daten und aus dem Entscheidungsmodell (unter ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) über den BHD der Einzelbäume aufgetragen. Während der Datensatz des Entscheidungsmodells ein deutlich breiteres BHD-Spektrum abbildet, sind in den empirischen Daten nur Einzelbäume mit einem BHD von 20 bis 46 cm hinterlegt. Insofern ist der Vergleich nur auf den kleineren BHD-Bereich beschränkt. Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Nutzungsvolumen

aus den empirischen Daten als auch die ökonomisch optimalen Nutzungsvolumen des Modells eine ähnliche Streuung und denselben Verlauf aufweisen. Allerdings zeigt die Teststatistik der Regressionsfunktionen³⁶ (Formel 36 und Formel 37; Log-Verteilung s. Anhang 7), dass signifikante Unterschiede im Intercept (Wald-Test: $p=1,17 \cdot 10^{-6}$) bestehen. Folglich weist das Ergebnis auf eine aus ökonomischer Sicht signifikant höhere Nutzung des Einzelbaumholzvolumens in den empirischen Daten hin.

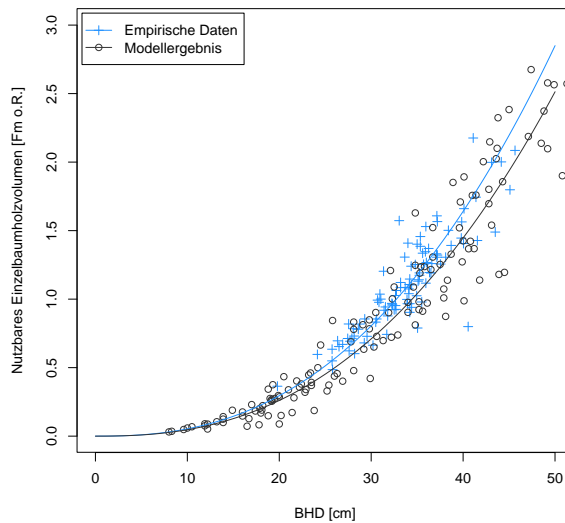


Abbildung 31: Vergleich der nutzbaren Einzelbaumholzvolumen (BVH) der empirischen Daten ($n=101$) und der Modellergebnisse unter ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität ($n=163$).

In Bezug zur Aufarbeitungsintensität des gesamten Baumes (Abbildung 32) bedeutet die höhere Nutzung in den empirischen Daten, dass über alle BHD hinweg die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität nach den Modellergebnissen durchschnittlich (Mean) mit 0,74 rd. 6 % geringer ausfällt (Formel 38 und Formel 39)³⁷. Allerdings existieren starke Überlappungsbereiche zwischen den beiden Klassen.

³⁶ Hierbei handelt es sich wiederum um den Likelihood-Quotienten-Test (LRS) und den Wald-Test.

³⁷ Auf die Berechnung einer linearen Regression wird in diesem Fall bewusst verzichtet, obwohl diese vermutlich für beide Klassen mit Zunahme des BHDs einen abnehmenden Verlauf annimmt. Jedoch ermöglicht die Verwendung des Mean als mittlere Aufarbei-

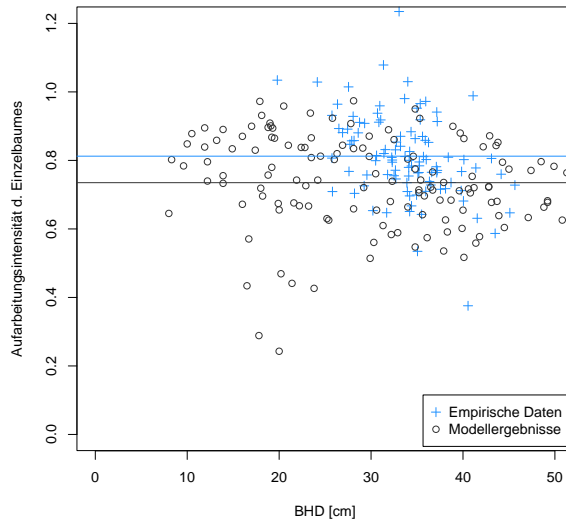


Abbildung 32: Vergleich der Aufarbeitungsintensitäten der empirischen Daten ($n=101$) und der Modellergebnisse unter ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität ($n=163$).

$$\text{BHV}_{\text{emp. Daten, HM}} = e^{-8,634 + \ln(\text{BHD}) * 2,474} * 1,0002 \quad R^2 = 0,81; \quad \text{Formel 36}$$

$$p < 2.22 * 10^{-16}$$

$$\text{BHV}_{\text{Modell, HM}} = e^{-8,759 + \ln(\text{BHD}) * 2,474} * 1,0002 \quad R^2 = 0,96; \quad \text{Formel 37}$$

$$p < 2.22 * 10^{-16}$$

$$\text{AI}_{\text{emp. Daten, HM}} = 0,81 \quad \text{Formel 38}$$

$$\text{AI}_{\text{Modell, HM}} = 0,74 \quad \text{Formel 39}$$

tungsintensität einen Vergleich mit der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität in der Krone bei der hochmechanisierten Holzernte (vgl. Abbildung 29 links).

6.4 Weitere Kenngrößen ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität

6.4.1 Aufarbeitungskosten, -erlöse und Deckungsbeiträge

Abbildung 33 stellt einen Vergleich der summierten Aufarbeitungskosten je Buchenkrone bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität für die hochmechanisierte Aufarbeitung dar. Als Datengrundlage dienen wiederum die 163 Buchen des RBS-Datensatzes sowie die Kosten-Erlös-Verhältnisse der Basisvariante (vgl. Kapitel 6.1). Es zeigt sich, dass die Aufarbeitungskosten mit steigendem BHD exponentiell ansteigen und bis zu einem BHD von 30 cm eine vergleichsweise geringe Streuung aufweisen. Ab einem BHD von 30 cm jedoch steigen die Kosten deutlich an, wobei eine breite Streuung der Kosten zu verzeichnen ist. Bereits bei einem BHD von 40 cm decken diese einen Bereich von nahe Null bis 25 EUR und bei einem BHD von 50 cm von 5 bis 45 EUR ab. Im Vergleich der Kronentypen weist die Teststatistik für die durchgeführten Regressionen (Funktionen s. Anhang 8; Log-Verteilung s. Anhang 9) auf signifikante Unterschiede bei der hochmechanisierten Aufarbeitung hin (LRS-Test: $p=0,02$; Wald-Test: $p=0,0003$). Der Kronentyp 3 erzeugt auf Grund des deutlich höheren Nutzungsvolumens die höchsten Gesamtkosten in der Buchenkrone.

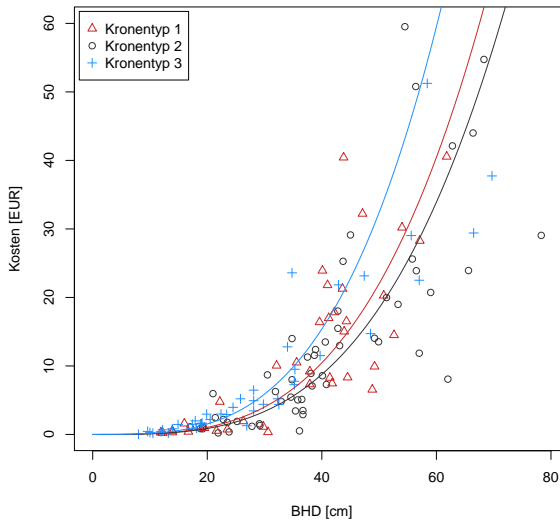


Abbildung 33: Darstellung der Aufarbeitungskosten je Buchenkrone (bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) getrennt nach Kronentypen über dem BHD der Untersuchungsobjekte (Funktionen s. Anhang 8).

Dass die Grenzkosten und nicht die Durchschnittskosten für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität in der Buchenkrone entscheidungsrelevant sind, zeigt die Abbildung 34. Über den gesamten BHD-Bereich streuen die Durchschnittskosten in der Krone unabhängig vom Kronentyp zwischen 10 und 46 EUR/Fm, sodass aus diesen Werten nicht auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität zurückgeschlossen werden kann.

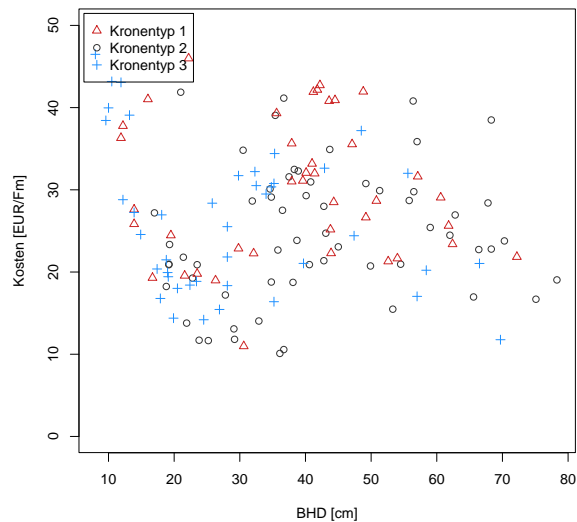


Abbildung 34: Darstellung der durchschnittlichen Aufarbeitungskosten je Fm (bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) getrennt nach Kronentypen über dem BHD der Untersuchungsobjekte.

Ein ähnliches Bild wie bei den Gesamtkosten der Kronenaufarbeitung zeigt sich bei dem Holzerlös unter ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität (Abbildung 35; Funktionen s. Anhang 10; Log-Verteilung s. Anhang 11). Neben der stärkeren Streuung der Holzerlöse ist auch hier der Einfluss des Kronentyps signifikant (Wald-Test: $p=0,0002$). Es wird zudem deutlich, dass den höheren Aufarbeitungskosten des Kronentyps 3 (vgl. Abbildung 33) nun auch die höchsten Erlöse gegenüberstehen.

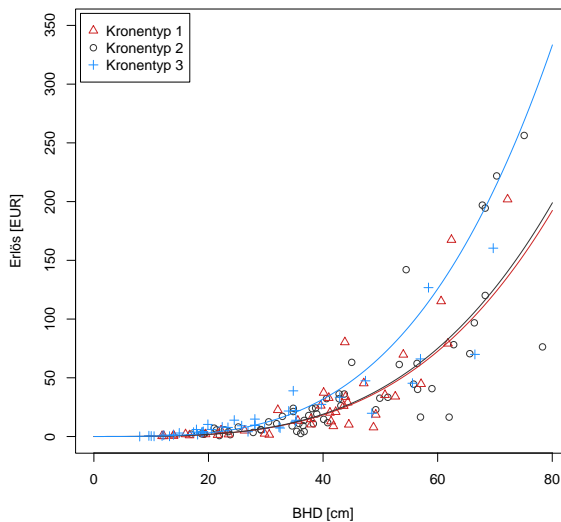


Abbildung 35: Darstellung des Erlöses je Buchenkrone [EUR] (bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) für die hochmechanisierte Holzernte über dem BHD [cm] und getrennt nach Kronentypen (Funktionen s. Anhang 10).

Der EKFE als Deckungsbeitrag aus Holzerlös und den Ernte- bzw. Rückekosten ermöglicht die Bestimmung der ökonomischen Vorteilhaftigkeit der jeweiligen Kronentypen. Abbildung 36 stellt die EKFE für die Kronen der Untersuchungsobjekte bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität getrennt nach Kronentypen gegenüber. Wie bereits bei den vorherigen Ausführungen zu den Kosten bzw. Erlösen zeigt sich bei der hochmechanisierten Holzernte eine deutliche Streuung der EKFE. Diese sind bis zum einem BHD von 30 cm vergleichsweise gering, von da ab nimmt aber mit steigendem BHD die Streuung deutlich zu und führt bei Bäumen mit einem BHD von etwa 40 cm zu einem EKFE von null bis zwanzig Euro über alle Kronentypen.

Die Regressionen (Funktionen s. Anhang 12; Log-Verteilung s. Anhang 13) stellen den Einfluss der Kronentypen auf die Höhe des EKFE (bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) dar. Bei der hochmechanisierten Aufarbeitung zeigen sich signifikante Unterschiede im Intercept (Wald-Test: $p = 0,0007$), wodurch ein signifikanter Einfluss des Kronentyps auf den EKFE geschlussfolgert werden kann. Insgesamt weist der Kronentyp 3 gegenüber Kronentyp 2 einen um 41 % bzw. gegenüber Kronentyp 1 einen um 55 % höheren EKFE auf.

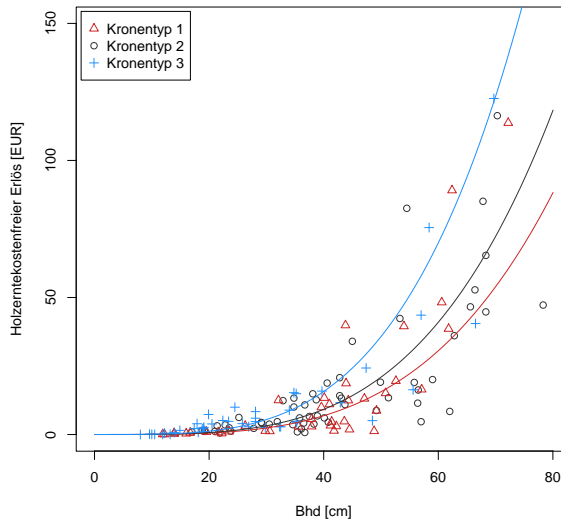


Abbildung 36: Darstellung des holzernkostenfreien Erlös in der Buchenkrone (bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) für die hochmechanisierte Holzern in Abhängigkeit vom BHD [cm] und getrennt nach Kronentypen (Funktionen s. Anhang 12).

6.4.2 Grenzzopf

Der Grenzzopf (GZ) bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität stellt für den Entscheider eine operationale Größe bei der Buchenkroneaufarbeitung dar. Dieser stellt bei den untersuchten Buchen des RBS-Datensatzes den Durchschnitt der drei RBS-Pfadergebnisse je Untersuchungsobjekt dar. Die Ergebnisse sind nur auf die im RBS-Datensatz enthaltenen Buchen anwendbar. In Abbildung 37 sind die Aufarbeitungsgrenzen für alle Kronen der RBS-Einzelbäume über dem BHD aufgetragen. Bei der statistischen Analyse der Daten zeigte sich, dass eine Trennung der Grenzzöpfe nach Kronentypen innerhalb des Aufarbeitungsverfahrens zu keinem signifikanten Ergebnis führt. Folglich ist von keinem signifikanten Einfluss der Kronentypen auf diese Größe auszugehen.

Tabelle 15 stellt die beschreibende Statistik für die Grenzzöpfe der hochmechanisierten Aufarbeitung vor. Deutlich wird hierbei die breite Spanne von 402 mm zwischen dem geringsten und dem stärksten Grenzzopf, wobei im Mittel (Mean) ein Zopfdurchmesser von 174 mm erreicht wird.

Tabelle 15: Beschreibende Statistik des Grenzzopfes unter ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität der RBS-Einzelbäume nach hochmechanisierter Kronenaufarbeitung.

Verfahren	n	Min [mm]	Median [mm]	Mean [mm]	Max [mm]
hochmechanisiert	142	29	175	174	431

Die Ursache für die breite Spanne der Aufarbeitungsgrenzen in der hochmechanisierten Aufarbeitung wird in der Abbildung 37 deutlich. Der Grenzzopf steigt mit steigendem BHD stark linear an (Formel 40). Die Streuung der Aufarbeitungsgrenzen beträgt dabei über allen BHDs rd. 200 mm. Insgesamt zeigt sich somit, dass der BHD für den Grenzzopf (bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) bei der hochmechanisierten Aufarbeitung relevant ist.

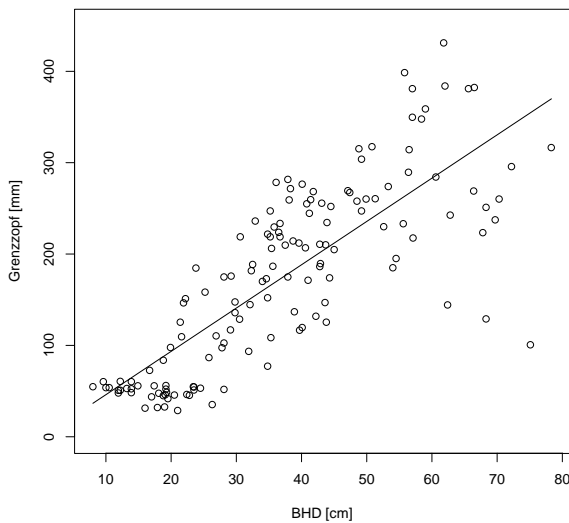


Abbildung 37: Grenzzopf (GZ) unter ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität in Abhängigkeit vom BHD der 163 RBS-Einzelbäume für die hochmechanisierte Kronenaufarbeitung.

$$GZ_{HM} = -1,3328 + 4,7395 * BHD \quad R^2=0,62 \quad \text{Formel 40}$$

6.5 Variantenstudium

Es ist eine große Stärke des entwickelten Modells, dass die Bestimmung der Aufarbeitungsintensität einem ökonomisch rationalen Modellansatz folgt und variabel auf Kosten- bzw. Erlösänderungen reagiert. Das Modell berücksichtigt zudem die spezifische Morphologie von Buchenkronen und erlaubt es den Einfluss von drei Kronentypen auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität zu testen. Die in den Kapitel 6.1 bis 6.4 vorgestellten Modellergebnisse wurden anhand der Basisvariante, welche die aktuell in Südniedersachsen zu erwartenden Kosten der hochmechanisierten Holzernte (175 EUR/MAS) und Erlöse (50 EUR/Fm) repräsentiert, berechnet. Im Folgenden wird nun anhand eines systematischen Variantenstudiums aufgezeigt, inwieweit sich die Modellergebnisse unter veränderten ökonomischen Rahmenbedingungen verschieben. Dafür wird das Kosten-Erlös-Verhältnis der Basisvariante und der Kronentyp 2 als Referenz (= Referenzvariante) gesetzt. Von diesem ausgehend werden die Kosten bzw. Erlöse in drei 10 % Schritten erhöht bzw. gemindert, sodass sich bedingt durch sieben unterschiedliche Kosten bzw. Erlöse insgesamt 49 Kosten-Erlös-Kombinationen ergeben. Diese Kombinationen können zudem getrennt für die drei Kronentypen ausgewertet werden (in Summe 147 Kombinationen). Für alle diese Kombinationen sind die ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensitäten mit den zugehörigen sonstigen Größen (nutzbare Kronenholzvolumen, EKFE, Grenzzopf usw.) berechnet worden.

Die folgenden Auswertungen fußen im Wesentlichen auf der Programmierungsstruktur von HUSMANN (2013, S. 104 ff).

6.5.1 Ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität

Wie bereits in Kapitel 6.3 vorgestellt, ist die Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen ökonomisch determiniert. Von der Abbildung 38 bis Abbildung 40 wird deutlich, dass die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität sehr flexibel auf Kosten-Erlös-Änderungen reagiert und sich entsprechend variabel anpasst.

Unter der Annahme (vgl. Schlussfolgerungen aus Kapitel 6.3), dass die zu analysierende Grundgesamtheit der Probestämme unverändert bleibt und die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen (bei hochmechanisierter Aufarbeitung) unabhängig von dem aufzuarbeitenden BHD des Einzelbaumes ist, können die ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensitäten unterschiedlicher Kosten-Erlös-Situationen über die mittleren Aufarbeitungsintensitäten (Mean) aller 163-RBS-Buchen berechnet und hinsichtlich des Einflusses von Erlös- bzw. Kostenänderungen untersucht werden. Die in den Abbildungen gezeigten Ausgleichsfunktionen werden dabei über die verallgemeinerte Methode der kleinsten Quadrate (R-Methode *gnls* (generalized least squares)) (PINHEIRO et al. 2014) an die mittleren Aufarbeitungsintensitäten bei entsprechenden Erlös-Kosten-

Situationen angepasst. Die Zusammenfassung der Regressionsfunktionen sind in Anhang 14 und Anhang 15 nachzulesen³⁸.

Aus den Abbildungen 38 und 39 wird der Zusammenhang zwischen den ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensitäten unterschiedlicher Erlös- bzw. Kostenvarianten und den verwendeten Kosten- bzw. Erlössätzen deutlich. Es zeigt sich bei beiden Darstellungen, dass unter den verwendeten Kosten-Erlös-Varianten die Spanne der ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität in der Krone zwischen 58 bzw. 25 % liegt und somit eine vollständige Aufarbeitung des Kronenholzes aus ökonomischer Sicht nicht optimal ist. Bei den unterschiedlichen Erlösvarianten fallen die ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensitäten mit der Zunahme der Aufarbeitungskosten abnehmend degressiv und nähern sich asymptotisch einem unbekanntem Minimum der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität an. Somit sinkt der Einfluss der Aufarbeitungskosten auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität mit deren Zunahme. Demgegenüber zeigt sich zwischen der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität unterschiedlicher Kostenvarianten und den Erlösen ein annähernd linearer Zusammenhang, sodass im Gegensatz zu den Kosten von einem gleichbleibenden Einfluss des Erlöses auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität auszugehen ist.

³⁸ Es sei an dieser Stelle nochmals darauf hingewiesen, dass die ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensitäten nur für solche Buchen gilt, welche vergleichbar mit denjenigen im RBS-Datensatz sind.

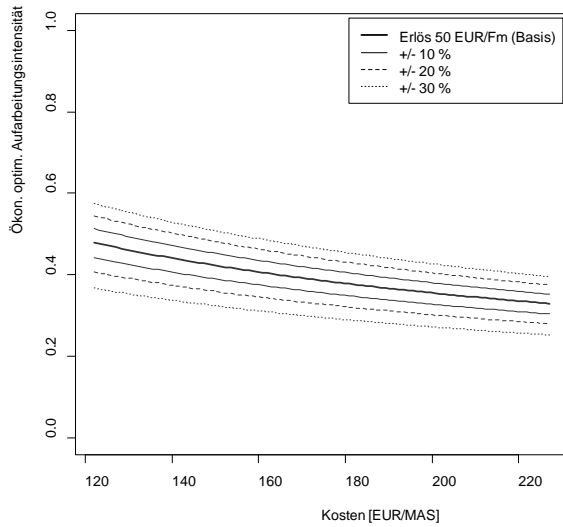


Abbildung 38: Ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensitäten von Buchenkronen verschiedener Erlös-Varianten in Abhängigkeit von den Aufarbeitungskosten. Die Berechnung basiert auf dem Kronentyp 2 (Regressionsfunktionen s. Anhang 14).

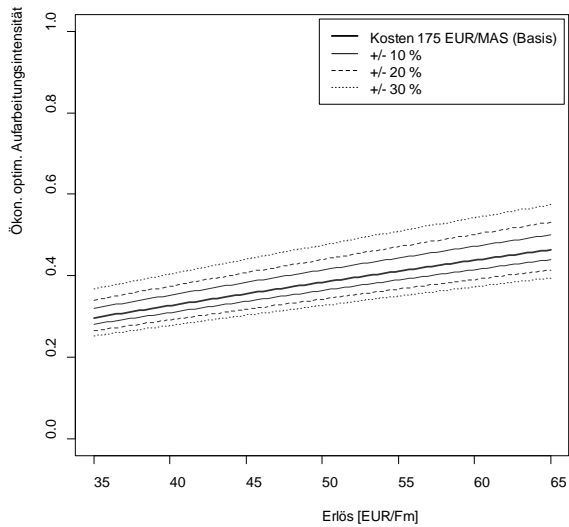


Abbildung 39: Ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensitäten von Buchenkronen unterschiedlicher Kosten-Varianten in Abhängigkeit von den Aufarbeitungskosten. Die Berechnung basiert auf dem Kronentyp 2 (Regressionsfunktionen s. Anhang 15).

Die erstellten Funktionen erlauben es, ausgehend von einer einzigen Kosten-Erlös-Variante, die Auswirkungen der Änderung eines einzelnen ökonomischen Parameters (*ceteris paribus*) auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen zu analysieren. Abbildung 40 stellt diese Art der ökonomischen Analyse für die Basisvariante (Erlös 50 EUR/Fm, Kosten 175 EUR/MAS) in absoluten Kosten- bzw. Erlösgrößen dar, wobei der Schnittpunkt beider Funktionen die Basisvariante mit einer ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von 0,38 Volumenanteilen repräsentiert. Sinken die Erlöse bzw. steigen die Kosten ausgehend von diesem Schnittpunkt, so führt dies zu einer Absenkung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität. Der weiße Bereich in der Diagramm-Zeichnungsfläche stellt somit diejenigen Aufarbeitungsintensitäten unter den entsprechenden Kosten-Erlös-Relationen dar, bei welchen die Aufarbeitung in der Buchenkrone ökonomisch vorteilhaft, aber nicht ökonomisch optimal ist. Steigen jedoch ausgehend von dem Schnittpunkt die Erlöse bzw. sinken die Kosten, so erhöht sich die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität (hellgraue Fläche). Der dunkelgraue Bereich repräsentiert hingegen denjenigen Anteil des Kronenholzvolumens, welches aus ökonomischer Sicht nicht zu nutzen ist, da deren Aufarbeitung negative (Grenz-) Deckungsbeiträge aufweist und somit zu einer Verringerung des EKFE führt. Die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität findet sich somit immer nur auf der schwarzen Erlös- bzw. roten Kostenkurve entsprechend der jeweiligen Erlös- bzw. Kostenänderung.

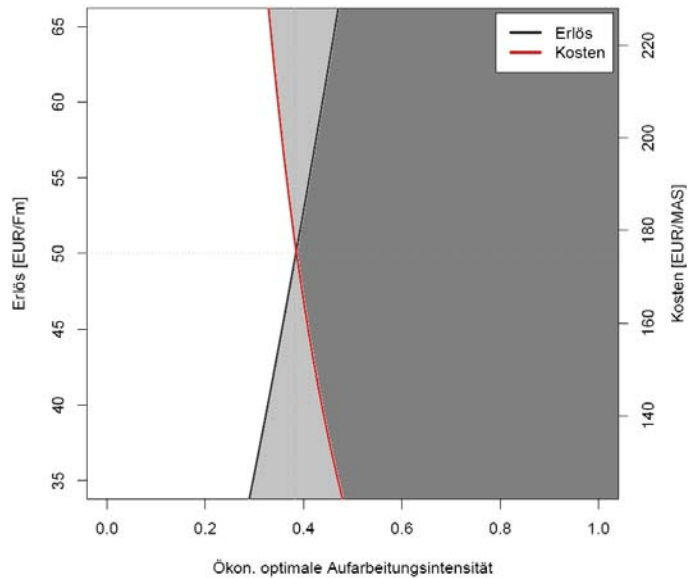


Abbildung 40: Limitierender Einfluss von Kosten bzw. Erlösen auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen ausgehend von der Basisvariante (Erlös 50 EUR/Fm, Kosten 175 EUR/MAS) unter Veränderung eines ökonomischen Parameters (*ceteris paribus*). Der dunkelgraue Bereich bleibt ungenutzt, der hellgraue Bereich ist bei entsprechender Kostenminderung bzw. Erlöserhöhung ökonomisch optimal zu nutzen. Die Berechnung basiert auf dem Kronentyp 2 bzw. der hochmechanisierten Aufarbeitung.

Die relative Änderung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität bei relativer Änderung der Erlöse bzw. Kosten wird in der Abbildung 41 dargestellt (vgl. HUSMANN 2013, S. 79). Diese Darstellung entspricht *de facto* einer Angebotselastizität, bei der sich die angebotene (hier: aufzuarbeitende) Menge entsprechend der relativen Änderungen der Erlöse bzw. Kosten anpasst. Für diese Darstellung ist eine Referenz notwendig, von der ausgehend die relativen Änderungen des nutzbaren Kronenholzvolumens bei relativer Änderung der Erlöse bzw. Kosten aufgetragen werden. Die Referenz wird in diesem Fall mit der bereits in den vorherigen Fällen verwandten Basisvariante (Erlös 50 EUR/Fm; Kosten 175 EUR/MAS) und dem Kronentyp 2 berechnet und besteht aus dem summierten, nutzbaren Anteils des Kronenholzvolumens (bei ökonomischer optimaler Aufarbeitungsintensität) aller 163 RBS-Einzelbäume. Die relative Änderung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität bei relativer Kosten-Erlös-Änderung ergibt sich durch erneute Modellberechnungen mit veränderten Kosten- bzw. Erlösverhältnissen (*ceteris paribus*), woraus summierte nutzbare Kronenholzvo-

lumen unterschiedlicher Höhe resultieren. Die relative Änderung des nutzbaren Kronenholzvolumens ergibt sich dann aus dem Vergleich der Ergebnisse der Referenz mit denen der Neuberechnungen unter veränderten Kosten-Erlös-Verhältnissen.

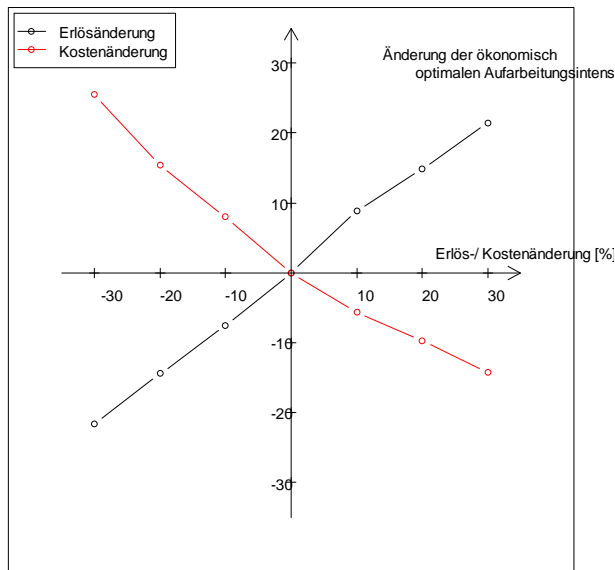


Abbildung 41: Prozentuale Änderung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität über prozentualer Änderung der Erlöse bzw. der Kosten bei der hochmechanisierten Buchenkronenaufarbeitung. Die Referenz stellt das Verhältnis von den beiden summierten Größen des ökonomisch optimal nutzbaren Kronenholzvolumens und des gesamten Kronenholzvolumens aller 163 RBS-Einzelbäume bei dem Kosten-Erlös-Verhältnis der Referenzvariante (Kosten 175 EUR/MAS; Erlös 50 EUR/Fm; Kronentyp 2) dar.

Deutlich wird in Abbildung 41, dass ausgehend von der Basisvariante der Einfluss von negativen Erlös- bzw. Kostenänderungen auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen zuerst annähernd gleich ist, jedoch bei stärkeren negativen Änderungen zu einem erhöhten Einfluss der Aufarbeitungskosten auf die Aufarbeitungsintensität führt. Steigen jedoch beide ökonomischen Parameter an (=positive Änderung), so führen die Erlöse auf Grund ihres annähernd linearen Verlaufen zu einem vergleichsweise höheren Einfluss auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität. Beispielsweise führt eine Erhöhung der Erlöse um 30 % zu einer relativen Änderung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität um rd. +22 %, die Senkung der Kosten – deren Senkung bspw.

durch die Wahl des Maschinenaggregates durch einen Entscheider aktiv beeinflusst werden kann – um dieselbe Größe hingegen zu einer Erhöhung um rd. 15 %.

Letztendlich wird deutlich, dass die Veränderung der ökonomischen Rahmenbedingungen zu erheblichen Änderungen der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen führen und insofern solche Abhängigkeiten bei weiteren Studien keineswegs zu vernachlässigen sind.

6.5.2 Weitere Kenngrößen ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität

Für die Darstellung der Größenänderung bei den sonstigen Kenngrößen ökonomisch optimaler Aufarbeitung wie bspw. das nutzbare Kronenholzvolumen oder der EKFE in Folge der Änderung der Kosten-Erlös-Verhältnisse bietet sich die Nutzung eines multiplen Regressionsmodells an (vgl. HUSMANN 2013, S. 75). Dieses erlaubt es, sowohl den Erlös, die Kosten als auch die Kronentypen als Dummy-Variablen in ein einziges Modell einzubinden. Der Vorteil dieses Modellansatzes liegt zudem darin, dass direkt aus den Modellergebnissen signifikante Unterschiede verschiedener Erlös-, Kosten- und Kronentypenvarianten erkennbar werden. Zudem stellen die parametrisierten Modellvariablen wie bei dem Modell im vorherigen Kapitel gleichzeitig eine Schätzfunktion für die sonstigen Kenngrößen ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität (Y) (= Schätzgröße) dar. Hierbei werden in dieser Dissertationsschrift nur das nutzbare Kronenholzvolumen [Fm] und der EKFE [EUR/Fm] bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität der Krone behandelt. Als erklärende Variable findet der BHD Berücksichtigung, da dieser in Gegensatz zu der im vorherigen Kapitel vorgestellten ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität bei den nun behandelten Größen erklärende Funktion hat. Für die Modellfunktion wird wie bei den vorherigen Ausführungen eine Exponentialfunktion verwendet. Die Anpassung der Funktion erfolgt in diesem Fall auch mit der Methode der kleinsten Quadrate (OLS) (R DEVELOPMENT CORE TEAM 2013). Für die Schätzung der Modellparameter müssen diese logarithmiert und anschließend rücktransformiert werden, sodass wiederum ein Korrekturfaktor λ notwendig (vgl. Kapitel 5.2.1) wird. Das Modell hat folgende Gleichung (Formel 41).

$$Y = e^{(\ln(\beta) + \alpha * \ln(BHD) + V_k + V_e + V_{kt})} * \lambda \quad \text{Formel 41}$$

Die Dummy-Variablen V_k (k = Kosten), V_e (e = Erlös) und V_{kt} (kt = Kronentyp) können somit zur Überprüfung der Sensitivität der Schätzgröße Y variiert werden. Sowohl die Kosten (122, 140, 157, 175, 192, 210 und 227) als auch die Erlöse (35, 40, 45, 50, 55, 60 und 65) werden wie oben angeführt in 10 % Schritten ausgehend von der Basisvariante (Kosten 175 EUR/MAS; Erlös 50 EUR/Fm) variiert. In Anhang 16 findet sich eine Zusammenfassung des Schätzmodells für das nutzbare Kronenholzvolumen, in Anhang 18 hingegen für den EKFE bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität. Die Gültigkeit der Modellergebnisse beschränkt

sich – wie auch bei den vorherigen Ausführungen – nur auf solche Buchen, welche vergleichbare Eigenschaften wie die des RBS-Datensatzes besitzen. Zur leichteren Übersicht wird auf die Darstellung der Datenpunkte bei den folgenden Abbildungen verzichtet.

Aus den Zusammenfassungen der Schätzmodelle sowohl für das nutzbare Kronenholzvolumen (vgl. Anhang 16) als auch den EKFE (vgl. Anhang 18) wird deutlich, dass alle Dummy-Variablen im Regressionsmodell – die Kosten, die Erlöse und die Kronentypen – als signifikante Faktoren identifiziert werden können. Die folgenden Ausführungen haben daher zum Ziel, die wichtigsten Auswirkungen von Änderungen der Inputvariablen vorzustellen. Jedoch wird sich hierbei bewusst nur auf die aussagekräftigsten Varianten beschränkt.

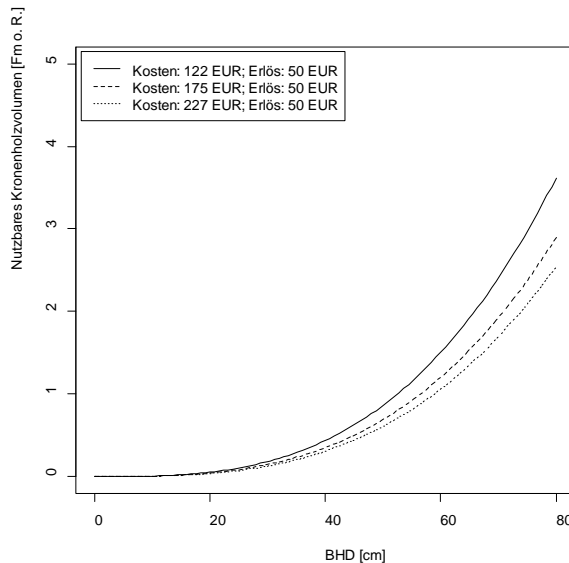


Abbildung 42: Aufzuarbeitendes Kronenholzvolumen bei ökonomisch optimaler Intensität bei unterschiedlichen Kostenvarianten (+/- 30 %) im Zuge der hochmechanisierten Kronenaufarbeitung. Die Funktionen beziehen sich auf den Kronentyp 2.

Abbildung 42 und Abbildung 43 stellen die nutzbaren Kronenholzvolumen bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität bei Kostenänderungen bzw. Erlösänderungen von +/- 30 % im Bezug zur Basisvariante und in Abhängigkeit vom BHD gegenüber. Die Kurven beziehen sich dabei auf den Kronentyp 2. Der Vergleich zeigt, dass der Einfluss des Erlöses deutlich größer ist und daher die absolute, nutzbare Kronenholzvolumendifferenz (ausgehend von der Basisvariante) bei einer 30 %-igen Erhöhung des Erlöses gegenüber einer 30 %-igen Senkung der Kosten bei einem BHD von 80 cm rund einen halben Festmeter beträgt. Entspre-

chend führt eine Minderung der Erlöse auch zu einem deutlich geringeren nutzba-
ren Kronenholzvolumen bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität.

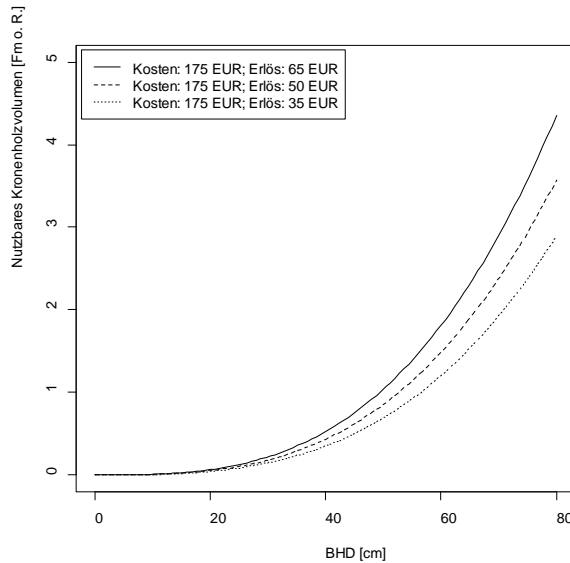


Abbildung 43: Aufzuarbeitendes Kronenholzvolumen bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität bei unterschiedlichen Erlösvarianten (+/- 30 %) im Zuge der hochmechanisierten Kronenaufarbeitung. Die Funktionen beziehen sich auf den Kronentyp 2.

Abbildung 44 gibt die Sensitivität des Modells in Form der prozentualen Änderung des nutzbares Kronenholzvolumens bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität bei einer anteiligen Kosten- bzw. Erlösänderung wieder³⁹. Demnach steigt im Verhältnis zur Referenz das nutzbares Kronenholzvolumen bei steigenden Erlösen stärker als bei entsprechender Kostenänderung. Eine 30 %-ige Erhöhung der Kosten führt zu einer etwa 5 %-igen geringeren Kronenholzvolumenänderungen gegenüber einer gleichstarken Erlöserhöhung. Sinken jedoch die Kosten bzw. Erlöse ausgehend von der Referenzvariante, so führen die relativen Änderungen beider Inputfaktoren zu einer vergleichbaren Änderung des nutzbares Kronenholzvolumens.

³⁹ Vgl. HUSMANN (2013, S. 79) für die motormanuelle Holzernte

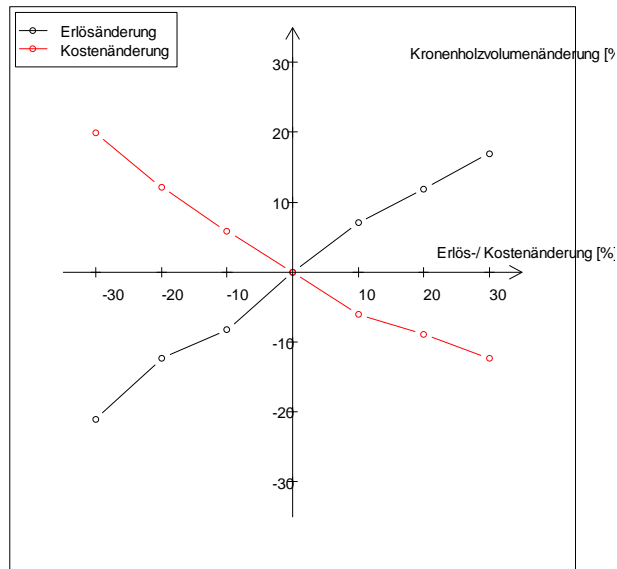


Abbildung 44: Prozentuale Änderung des nutzbaren Kronenholzvolumens bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität über prozentualer Änderung der Erlöse bzw. der Holzzerkosten bei der hochmechanisierten Buchenkronenaufarbeitung. Die Referenz stellt das summierte, nutzbare Kronenholzvolumen aller 163 RBS-Einzelbäume bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität, berechnet anhand der Basisvariante (Kosten 175 EUR/MAS; Erlös 50 EUR/Fm; Kronentyp 2), dar.

Eine weitere Möglichkeit die Folgen unterschiedlicher Kosten-Erlös-Verhältnisse darzustellen, besteht darin diese – statt hinsichtlich des nutzbaren Kronenholzvolumens – mit dem erntekostenfreien Erlös (EKFE) aus der Krone (bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) aufzutragen. Hierbei wird der stärkere Einfluss der Erlöse bedingt durch die Multiplikation des nutzbaren Kronenholzvolumens mit dem positiven EKFE besonders deutlich (Abbildung 45 und Abbildung 46). Liegen bei einer Kostenänderung um 30 % gegenüber der Referenz (122 bzw. 227 EUR/MAS) bei einem BHD von 30 cm alle drei Funktionen noch sehr eng zusammen, zeigen sich bei einer gleichstarken Erlösänderung deutliche Unterschiede, die mit steigenden BHD zudem ansteigen. Folglich zeigt diese Darstellung wiederum, dass eine relative Veränderung der Erlöse deutlich stärkere Auswirkungen zeigt als die relative Veränderung der Kosten.

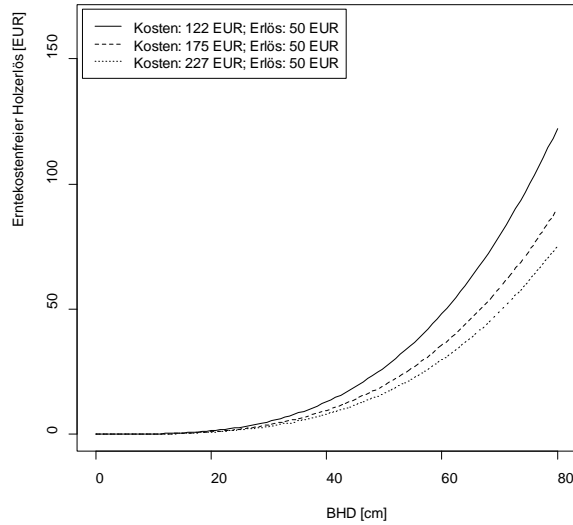


Abbildung 45: Erntekostenfreier Holzerlös je Krone bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungssintensität bei unterschiedlichen Kostenvarianten.

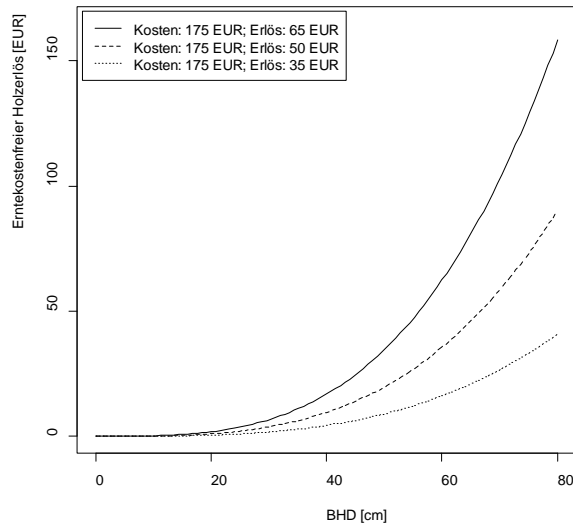


Abbildung 46: Erntekostenfreier Holzerlös je Krone bei ökonomisch optimaler Intensität bei unterschiedlichen Erlösvarianten im Zuge der hochmechanisierten Buchenkronenaufarbeitung.

Die Sensitivität des Modells bei relativen Kosten- bzw. Erlösänderungen hinsichtlich der relativen Änderung des EKFE in der Krone zeigt Abbildung 47. Wie bei Abbildung 44 beinhaltet die Referenz Aufarbeitungskosten von 175 EUR/MAS, einen Erlös von 50 EUR/Fm und den Kronentyp 2. Deutlich wird in dieser Abbildung, dass sich ausgehend von der Referenzvariante die Erlösänderungen in einem annähernd linearen Zusammenhang auf den EKFE niederschlagen. Eine relative Erhöhung bzw. Minderung der Erlöse um 20 % führt damit zu einer doppelt so hohen relativen Änderung des EKFE (40 %). Demgegenüber führen relative Änderungen bei den Kosten zu einer deutlichen geringeren Änderung des EKFE. Bei einer relativen Erhöhung bzw. Minderung der Kosten um 20 % kommt es lediglich zu einer Änderung des EKFE um 10 %. Damit hat ausgehend von der Referenzvariante und im Vergleich zur relativen Kostenänderung die relative Änderung des Erlöses einen vierfach stärkeren Einfluss auf den EKFE.

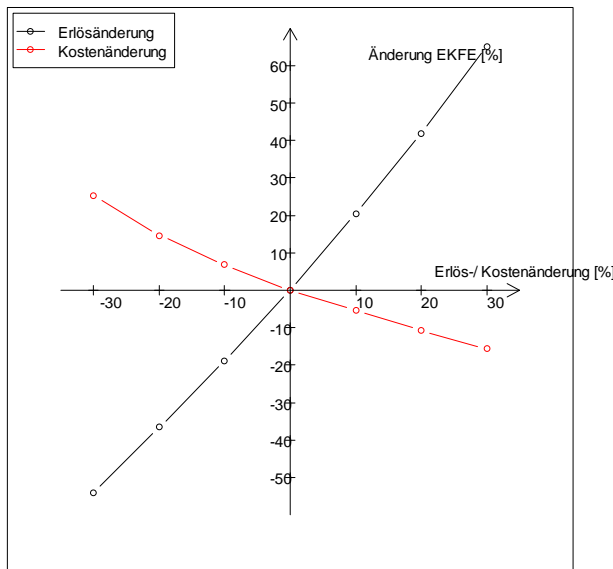


Abbildung 47: Prozentuale Änderung des erntekostenfreien Holzerlöses (EKFE) bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität über prozentualer Änderung der Erlöse bzw. der Holzentkosten bei der hochmechanisierten Buchenkronenaufarbeitung. Die Referenz stellt das summierte, nutzbare Kronenholzvolumen aller 163 RBS-Einzelbäume bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität, berechnet anhand der Basisvariante (Kosten 175 EUR/MAS; Erlös 50 EUR/Fm; Kronentyp 2), dar.

Bei beiden Regressionsmodellen (nutzbare Kronenholzvolumen bzw. EKFE bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) wurden die Kronentypen als signifikante Einflussfaktoren für das Modell identifiziert⁴⁰. Die Regressionsmodqelle lassen in ihrem Aufbau zu, dass neben den Kosten und Erlösen auch der Kronentyp variiert und entsprechend unterschiedliche Auswirkungen auf die nutzbaren Kronenholzvolumen bzw. den EKFE (jeweils bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität) aufgezeigt werden können. Abbildung 48 zeigt den Einfluss der Kronentypen auf die Höhe des EKFE bei der Referenzvariante (Kosten 175 EUR/MAS; Erlös 50 EUR/Fm). Bereits ab einem BHD von 20 cm sind Unterschiede in der Höhe der EKFE erkennbar, die mit ansteigendem BHD zunehmen. Bei einem BHD von 35 cm zeigt sich zwischen den Funktionen bereits eine Differenz rund 5 EUR je Krone.

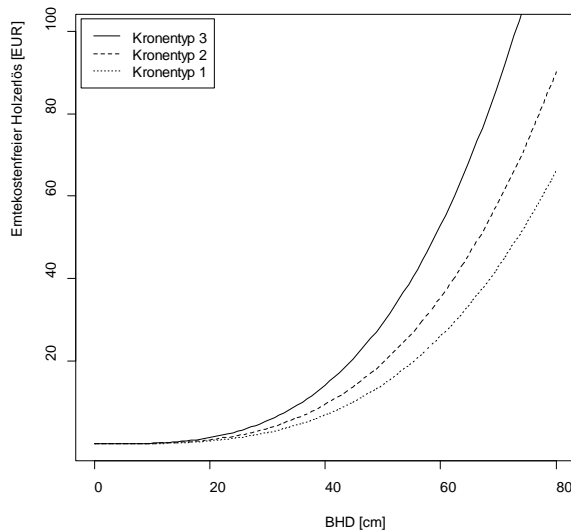


Abbildung 48: Erntekostenfreier Holzerlös (EKFE) je Krone bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität in Abhängigkeit vom Kronentyp im Zuge der hochmechanisierten Kronenaufarbeitung.

⁴⁰ Die Modellergebnisse zeigen, dass die Koeffizienten der Kronentypen signifikant von Null verschieden sind und somit die Modellgüte verbessern (vgl. Anhang 17 und Anhang 19).

Die absoluten Differenzen beim EKFE zwischen den Kronentypen bei unterschiedlichen Erlösen sind in Abbildung 49 dargestellt. Die Null-Linie wird durch den Kronentyp 2 repräsentiert, sodass sich die Differenzen sich aus der Höhe des EKFE des Kronentyps 1 bzw. 3 zu dem des Kronentyps 2 berechnen. Der Abstand zwischen den Kronentypen 1 und 3 wiederum kann als diejenige EKFE-Differenz angesehen werden, welche bei einer Durchforstung eines Buchenbestandes mit hochmechanisierten Erntesystemen zu erwarten ist. Aus der Betrachtung der abgebildeten Erlösvarianten wird deutlich, dass ausgehend vom Kronentyp 2 ein steigender Erlös zu einer steigenden Differenz der EKFE bei den Kronentypen führt bzw. ein geringerer Erlös zu einer Verringerung der Differenz. Bereits bei einer Erhöhung des Erlöses um 20 % auf 60 EUR/Fm bei einer Buche mit einem BHD von 35 cm steigt die Spanne des EKFE auf 7,12 EUR je Krone, bei einer Minderung um 20 % auf 40 EUR/Fm sinkt die Spanne um 4,29 EUR auf 2,83 EUR je Krone (Anhang 21).

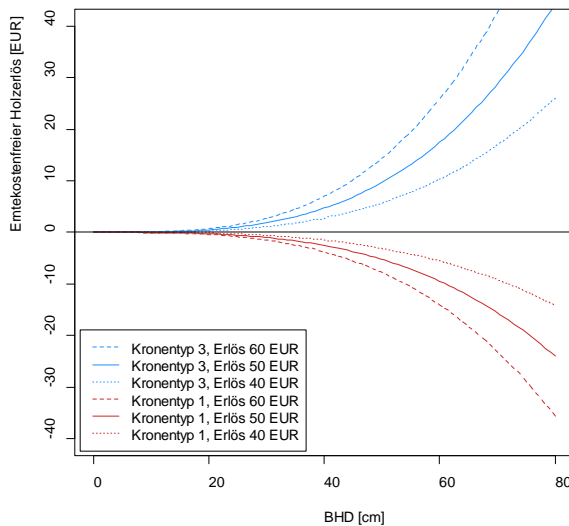


Abbildung 49: Differenz der erntekostenfreien Holzerlöse je Krone zwischen dem Kronentyp 2 (Null-Linie) und den übrigen Kronentypen bei verschiedenen Erlösvarianten (40 EUR, 50 EUR, 60 EUR) und fixen Maschinenarbeitskosten von 175 EUR/MAS.

Die Abhängigkeit der Höhe des EKFE von den Kronentypen bei verschiedenen Kostenvarianten ist Anhang 20 zu entnehmen. Wie auch bereits bei den übrigen Auswertungen wird hierbei deutlich, dass die Variation der Kosten nur zu einer geringeren EKFE-Spanne führt. Grundsätzlich sei an dieser Stelle erwähnt, dass durch forstliche Maßnahmen nur geringfügig die Form der Krone bestimmt werden kann. Wichtig ist aber hierbei zu erkennen, dass bei einer normalen Durch-

forstung die anfallenden Buchenkronen in Abhängigkeit von der Erlös- bzw. Kostensituation einen unterschiedlich hohen EKFE erwarten lassen.

Im Folgenden soll anhand einer Beispielrechnung die Auswirkungen der Erlös-, Kosten- und Kronentypenvarianten auf einen Hektar Durchforstungsfläche bezogen nur auf die Ernte von Buchenkronen aufgezeigt werden. Der ausscheidende Bestand ($n=50$) habe einen BHD von 35 cm und die Kronen ein potentiell nutzbares Kronenholzvolumen von 0,685 Fm/Krone. Die Ergebnisse des Variantenstudiums zeigen eine Spanne des EKFE von 288 EUR/ha (190 EUR/ha [Nr. 7] bis 478 EUR/ha [Nr. 6]), welche aus einer Holzvolumendifferenz je Hektar von 3,77 Fm/ha (11,30 Fm/ha [Nr. 7] bis 15,07 Fm/ha [Nr. 6]) resultiert. Die größte Holzvolumendifferenz jedoch ergibt sich mit 7,88 Fm/ha zwischen Variante [3] und [7], da sich hier die höchste (19,18 Fm/ha) und die niedrigste (11,30 Fm/ha) ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität gegenüber steht. Die Extremwerte bei dem EKFE kommen im Zuge der Erlösänderungen um +/- 20 % zu Stande, wobei die Nr. 3 (Variante mit Kronentyp 3) trotz 20 % geringeren Erlösen zu nahezu gleichen EKFE kommt. Ursächlich hierfür ist die um 12 %-Punkte höhere ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität, wodurch besonders der starke Einfluss des Kronentyps bzw. der Kronenmorphologie auf die EKFE aus Buchenkronen unter ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität deutlich wird. Der Kronentyp 1 [Nr. 2] hingegen erzielt trotz 20 % höherer Erlöse nur einen um 46 EUR/ha höheren EKFE als die Variante mit dem geringsten EKFE. Die Kostenvarianten [Nr. 4 u. Nr. 5] liegen jeweils rund 60 EUR/ha über bzw. unter der Referenzvariante und schwanken damit nur in einem deutlich geringeren Maßstab.

Tabelle 16: Beispielrechnung für die ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensitäten bzw. holz-erntekostenfreien Erlöse (EKFE) aus Buchenkronen einer Hiebsmaßnahme mit 50 ausscheidenden Bäumen von einem BHD von 35 cm unter unterschiedlichen Kosten-, Erlös- und Kronentypenvarianten.

Nr.	Variante	Kronen- typ	Kosten [EUR/ MAS]	Erlös [EUR/ Fm]	Aufarb.- intensität	EKFE [EUR/ Kr.]	EKFE [EUR/ ha]
1	Referenz	2	175	50	0,38	6,51	326,-
2	Kronentyp 1	1	175	50	0,32	4,71	236,-
3	Kronentyp 3	3	175	50	0,56	9,55	478,-
4	Kosten +20 %	2	210	50	0,35	5,22	261,-
5	Kosten – 20 %	2	140	50	0,44	7,76	387,-
6	Erlös +20 %	2	175	60	0,44	9,56	478,-
7	Erlös – 20 %	2	175	40	0,33	3,80	190,-

7 Wertung und Ausblick

Die Frage der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Bäumen bzw. im Speziellen von Buchenkronen ist bisher in der forstlichen Wissenschaft noch weitestgehend unbeantwortet geblieben. Dabei liegt es nicht an deren Relevanz – denn immerhin muss eine solche Entscheidung ggf. mehrmals an einem aufzuarbeitenden Baum getroffen werden –, sondern die Problematik liegt vielmehr in der Schwierigkeit, die komplexe Kronenmorphologie von Bäumen mit entsprechend detaillierten Kosten- bzw. Erlösinformationen zu verbinden, sodass damit ökonomisch belastbare Analysen getätigt werden können. Aus diesem Grund ist man in der Vergangenheit sehr pragmatisch an dieses Problem herangetreten und hat in den bisherigen Lösungsansätzen die Aufarbeitungsintensität eines Baumes als rein technisches Problem angesehen. Eine Berücksichtigung ökonomischer Zusammenhänge erfolgte immer nur innerhalb des technisch verfügbaren Potentials bspw. durch eine ökonomisch optimale Sortimentierung. Dabei ist sich der Entscheider bei der „realen“ Aufarbeitung eines Baumes häufig der Zusammenhänge und seiner verursachten Kosten bewusst, jedoch besteht selbst für ihn die Schwierigkeit, unter den komplexen Zusammenhängen der Kronenverzweigung seine eigenen Kosten zu quantifizieren und die Aufarbeitungsintensität entsprechend der sich stetig wechselnden Kronenverzweigung bzw. den abnehmenden Astdurchmessern anzupassen. Aus Vereinfachungsgründen wird daher meistens in der forstlichen Praxis auf das „Bauchgefühl“ gesetzt und somit eine intuitive Entscheidung (heuristischer Ansatz) – die mithin auch eine ökonomisch optimale Entscheidung sein kann – getroffen. Bei diesen Entscheidungen handelt es sich folglich zu einem überwiegenden Anteil um Einzelfallentscheidungen, welche der Entscheider aus den ihm zur Verfügung stehenden Informationen heraus trifft, deren Wiederholbarkeit jedoch auf Grund der veränderten Ausgangsbedingungen

bei Folgeentscheidungen und der zugehörigen komplexen Entscheidungsprozessen häufig nicht gegeben ist.

Mit dem hier erstellten betriebswirtschaftlichen Modell wird versucht, die komplexe Realität der Kronenaufarbeitung auf einige wenige relevante Einflussfaktoren zu reduzieren, um so die notwendige Transparenz in einen diffusen Aufarbeitungsprozess zu bringen und um hieraus wiederum Abhängigkeiten zu erkennen. Grundsätzlich muss es das Ziel sein, ein Modell des Operation Research (vgl. Kapitel 3.2) mit mathematischen Mitteln zu lösen und dies allein erfordert eine Abkehr von intuitiven Einzelfallentscheidungen bzw. Veränderung hin zu rationalen Entscheidungsregeln. Nur anhand solcher Regeln lassen sich Rechenvorgänge wiederholen und Modelle auf ihre Sensibilität hin überprüfen. Alle bisherigen, vorwiegend an der Praktikabilität der Umsetzung angelehnten wissenschaftlichen Ansätze ermöglichen lediglich eine grobe Näherung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität; eine funktionale (mit Berücksichtigung der Kronenmorphologie) und nachvollziehbare (mit transparenten Entscheidungsprozessen und -regeln) Bestimmung dieser erlauben sie jedoch nicht. Der in dieser Dissertationsschrift erstellte Lösungsansatz ist dahingehend sehr fortschrittlich, da er sowohl die baumartenspezifischen (Kronen-)Eigenschaften vergleichsweise detailliert berücksichtigt als auch auf einer fundierten Kostenanalyse (vgl. Kapitel 4) fußt.

Dabei ist eine Stärke des Modells, dass es den Entscheidern zum einen die ökonomischen Zusammenhänge der Kronenaufarbeitung erklärt (Erklärungsmodell) und sie entsprechend sensibilisiert. Zum anderen erleichtert das Modell den Entscheidern aber auch anhand der ausgeworfenen Ergebnisse wie bspw. dem ökonomisch optimalen Grenzzopf oder der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität das Erkennen optimaler Handlungen und wird somit seiner Aufgabe als Entscheidungsmodell gerecht. Die Grenzen des Modells sind allerdings dann erreicht, wenn reale Handlungsentscheidungen am Objekt (Buchenkrone) direkt getroffen werden müssen. Dies bleiben Einzelfallentscheidungen, welche nicht durch ein abstrahierendes Modell gelöst werden können.

Wie die folgenden Unterkapitel jedoch zeigen, ist dieses Modell lediglich ein erster Schritt in Richtung Optimierung der Aufarbeitungsintensität von Baumkronen. Vergleichbare Modelle finden sich in der forstlichen Wissenschaft aus Sicht des Autors nicht. Insofern kann das hier erstellte Modell auch nicht den Anspruch eines abschließenden Modells haben. Aus Sicht des Autors besteht weiterer wissenschaftlicher Forschungsbedarf insbesondere bei den übrigen Laubbaum- und auch bei den Nadelbaumarten. Aber auch hinsichtlich des Aufarbeitungsverfahrens, den zugehörigen Aufarbeitungsprozessen oder bei den berücksichtigten Parametern ist weiterer Forschungsbedarf erkennbar (vgl. Kapitel 7.1 und Kapitel 7.2).

7.1 Entscheidungsmodell

Letztendlich muss ein ökonomisches Modell für die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität nicht unbedingt kompliziert und umfangreich sein, um die aus Sicht des Autors wichtigsten ökonomischen Einflussfaktoren zu berücksichtigen und um einen hohen Erklärungsgehalt zu beinhalten. Das im Rahmen dieser Dissertation erstellte Modell verarbeitet lediglich nur einen einzigen Erlös- bzw. Kostenfaktor und reduziert den Holzbereitstellungsprozess auf die Aufarbeitung in einer Buchenkrone. Nichtsdestotrotz zeichnet sich das Modell – wie die Ergebnisse zeigen – durch einen vergleichsweise hohen Erklärungsgehalt aus. Der Schlüssel hierfür ist die verursachungsgerechte Zuordnung sowohl der Kosten als auch der Erlöse auf ein Produktionsmodell, welches die buchentypische Kronenverzweigung mit einem hohen Detailgrad beinhaltet. Aus ökonomischer Sicht ist besonders die konsequente Anwendung des Grenzkostenprinzips hervorzuheben, welche bisher auf Grund des Fehlens entsprechender Kalkulationsgrundlagen nur bedingt in Modellen umgesetzt werden konnte. Dafür müssen bekanntlich die zu verwendenden Kostensätze höchste Ansprüche erfüllen, insbesondere müssen sie sich in ihrer Höhe stetig an das sich ebenfalls stetig ändernde Produktionsmodell anpassen. Die üblicher Weise in der Literatur zu findenden Durchschnittskosten je Festmeter, welche die Aufarbeitung unterschiedlichster Astdurchmesser oder/und Verzweigungsstärken beinhalten, sind für diesen methodischen Ansatz unmittelbar nicht tauglich. Insofern kann das hier erstellte Modell auch einen wichtigen Beitrag zum Verständnis des Grenzkostenansatzes in forstlichen Entscheidungsmodellen leisten.

Nichtsdestotrotz sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass umfangreiche Modelle wie bspw. „Der Waldplaner 2.0“ (NAGEL et al. 2006) durchaus für die Abbildung komplexer Vorgänge ihre Vorzüge haben können, insbesondere da der Abstraktionsgrad deutlich geringer ist. So werden in dem hier erstellten Lösungsansatz Bestandeseigenschaften oder unterschiedliche Bodenverhältnisse völlig unberücksichtigt gelassen, obwohl diese durchaus einen Einfluss auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität haben können. Allerdings sinkt mit jeder weiteren Modell-Inputgröße auch die Transparenz und Verständlichkeit eines Modells bzw. es steigt die Gefahr von ungewollten Interaktionen innerhalb des Modells. Insofern ist die Begrenzung auf drei Inputgrößen aus Sicht des Autoren durchaus zielführend, insbesondere da die Modellergebnisse valide sind.

Für die Erstellung des Entscheidungsmodells hat sich die Durchführung der videobasierten Prozesskostenanalyse insbesondere für das Erlangen von detaillierten Kenntnissen über die Prozessabläufe bzw. die damit zusammenhängende Kostenentstehung und damit wiederum für die ökonomische Bewertung der hochmechanisierten Holzernte als sehr zielführend gezeigt, wie u.a. die Validierungsergebnisse zeigen (vgl. Kapitel 6.3.1). Wie bereits von SPEIDEL (1952, S. 30) erwähnt, bietet nur eine Filmaufnahme die Möglichkeit, solch komplexe Aufarbei-

tungsprozesse detailliert zu analysieren. Auch die Möglichkeit, die zu analysierenden Prozessschritte hinsichtlich ihrer Abgrenzung im Aufarbeitungsprozess zu Beginn der Videoauswertung laufend zu hinterfragen und nach zu justieren, verbesserte die Aussagekraft der Analyse und ermöglichte die eindeutige Identifikation der Kostentreiber der hochmechanisierten Kronenaufarbeitung, wie es bisher nicht möglich war. Zudem konnten Sondersituationen wie bspw. technische Probleme am Harvesteraggregat (z. B. Riss der Kette) oder auch Buchen mit Kronenbrüchen anhand des „Videobeweises“ aus der Analyse ausgeschlossen werden, sodass Fehlinterpretationen durch nicht nachvollziehbare Ausreißer im Datensatz vermieden wurden.

Der Optimierungsalgorithmus setzt auf die ökonomische Bewertung der einzelnen Randomized-Branch-Sampling-Segmente (RBS) auf und bestimmt in einem iterativen Verfahren die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität. Die wichtigste Eigenschaft des Verfahrens findet sich aus Sicht des Autors in der rekursiven Vorgehensweise (vgl. Kapitel 3.6 und 5.3.1), welche sich bereits in der Vergangenheit für die Optimierung am Einzelbaum bewährt hat (vgl. bspw. BONT 2005, S. 100 ff). Hierdurch wird zum einen das ökonomisch Optimum in sehr kurzer Rechenzeit bestimmt, zum anderen ermöglicht dieses Vorgehen den problemlosen Umgang mit Sprungkosten, welche in Folge der Aufarbeitung von schnittrelevanten Verzweigungen (SRV) auftreten und das Vielfache der Grenzerlöse betragen können. Würde der Entscheidungsprozess entlang der Aufarbeitungsrichtung geführt, so würde das Vorhandensein von SRV regelmäßig zur Beendigung der Aufarbeitung führen. Erst aus rekursiver Sicht zeigt sich, ob „hinter“ einer SRV noch positive Deckungsbeiträge zu erwarten sind und die Aufarbeitung entsprechend fortzuführen ist.

Die Umsetzung einer ökonomischen Bewertung am Einzelbaum und deren Optimierung kann nur erfolgen, wenn ein baumartenspezifisches und ein Kronenmorphologie berücksichtigendes naturales Produktionsmodell gefunden wird. Mit der Wahl des RBS-Verfahrens als Grundlage für das naturale Produktionsmodell ist eine grundlegende Entscheidung getroffen worden, wobei durch die Nutzung des RBS-Verfahrens die folgenden drei wichtigen Punkte umgesetzt werden konnten:

1. Die Ableitung von baumartenspezifischen Eigenschaften und Festlegung in einem Produktionsmodell (inkl. BHD des Einzelbaumes, Identifikation von Stamm-/Kronenbereich, Bildung von Kronentypen, Anzahl und Stärke der Verzweigungen, sämtliche Astdurchmesser u.v.m.).
2. Die verursachungsgerechte Kosten- und Erlösbewertung entsprechend des Grenzkostenansatzes (inkl. Kostenbewertung einzelner Verzweigungen, Astdurchmesser und -längen, verfahrensspezifische ökonomische Bewertung).
3. Die ökonomische Optimierung der Aufarbeitungsintensität durch den segment-/knotenweisen Aufbau der RBS-Pfade.

Die größte Stärke in dem Verfahren liegt aus Sicht des Autors in der Darstellung der baumartenspezifischen Kronenmorphologie. Die überwiegende Anzahl der bisher in der Wissenschaft verwendeten Aushaltungsmodelle (vgl. Kapitel 1.1) verwenden als Basis Schaftformfunktionen, welche die baumartenspezifischen Unterschiede in der Krone lediglich durch eine unterschiedliche Ausbauchung der Schaftform darstellen können. SCHMIDT (2001, S. 48) zeigt in seiner Dissertationsschrift, dass die Präzision der Abbildung des Kronenholzvolumens von Laubbäumen durch Schaftformfunktionen unterschiedlicher Art⁴¹ unzureichend ist und verzichtet daher vollständig auf eine Verwendung von Schaftformfunktionen zur Beschreibung der Astdurchmesser in dem Kronenbereich von Laubbäumen. Allerdings kann SCHMIDT (2001), wie auch andere Autoren, keinen alternativen Ansatz bieten.

Mit dem RBS-Verfahren gelingt es jedoch zum einen die komplexe Kronenmorphologie auf Basis der Kronenastdurchmesser zu drei Kronentypen zusammen zu fassen, wie es bisher nur visuell und damit nicht objektiv durchführbar war. Dies hat den Vorteil, dass der Einfluss der Kronenmorphologie bzw. des Kronentyps auf verschiedene ökonomische Größen analysiert werden kann. Durch die RBS-Klassifikation sind zudem die Modellergebnisse ansatzweise auf die visuell anzusprechenden Kronentypen nach HENGST (1964), wie sie in der Prozesskostenanalyse Anwendung fanden, übertragbar, da sowohl in der Prozesskostenanalyse als auch im Entscheidungsmodell vergleichbare Ergebnisse erzielt wurden. Aus Sicht des Autors kann somit der Kronentyp 3 am ehesten dem wipfelschäftigen Kronentyp, der Kronentyp 2 hingegen dem besenförmigen bzw. der Kronentyp 1 dem zwiesel förmigen Kronentyp zugeordnet werden. Entsprechend ist es zulässig, die Forschungsergebnisse sowohl hinsichtlich der RBS-Kronenklassifizierung als auch den Kronentypen nach HENGST (1964) zu interpretieren und mit anderen Studienergebnissen zu vergleichen.

Zum anderen ermöglicht die Verwendung des RBS-Verfahrens eine ökonomische Bewertung auf Basis des Grenzkostenansatzes, bei dem die Kosten entsprechend ihres Anfalls verursachungsgerecht zugerechnet werden müssen. So können insbesondere die schnittrelevanten Verzweigungen, welche bei der Prozesskostenanalyse als die Kostentreiber bei der hochmechanisierten Kronenaufarbeitung identifiziert worden sind, in die ökonomische Bewertung einfließen. Das einzige Defizit besteht aus Sicht des Autors darin, dass Sortimentslängen bei der Bewertung nicht berücksichtigt wurden und somit das Kronenholz hinsichtlich der öko-

⁴¹ Zur Darstellung individueller Schaftformfunktionen haben sich je nach Detailtiefe des Modellansatzes hochgradige Polynome, Spline-Funktionen und lineare Funktionen als sehr geeignet erwiesen. Für weiterführende Informationen hierzu sei auf SLOBODA et al. (1997) verwiesen.

nomisch optimalen Einschnittlänge nicht optimiert wurden. Zukünftige Studien sollten sich ggf. dieses Themas annehmen.

Eine weitere Stärke des RBS-Verfahrens ist es, dass die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität grundsätzlich auch bei anderen Baumarten durchführbar ist, vorausgesetzt, es liegt eine ausreichende Anzahl von RBS-Daten von Einzelbäumen vor und die baumarten- und verfahrensspezifischen Zeitverbräuche und Prozessabläufe der Aufarbeitung können beschrieben und quantifiziert werden. Grundsätzlich sind zur Umsetzung nur leichte Änderungen am Quellcode für die ökonomischen Bewertung (vgl. Kapitel 5.3.1) vorzunehmen. Die hier erzielten Ergebnisse zur Baumart Buche sollten allerdings auch auf die übrigen Laubbaumarten bzw. Laub-Baumartengruppen übertragen werden können, da sich die Aufarbeitungsprozesse innerhalb der Laubbaumarten vermutlich wenig unterscheiden. Eine Übertragbarkeit auf Nadelbäume empfiehlt sich hingegen nicht, da deren Wuchs deutlich von der Baumart Buche abweicht. Grundsätzlich kann aus Sicht des Autors bei Nadelbäumen auf die in der Vergangenheit verwendeten Schaffformfunktionen zurückgegriffen werden, da sich deren Einsatz bewährt und die Güte der Anpassung sehr hoch ist.

Die drei RBS-Pfade an den Einzelbäumen im RBS-Datensatz stellen letzten Endes nur eine Grundgesamtheit von drei möglichen Nutzungspfaden am Baum dar. Auf Grund der mannigfaltigen Verzweigung und Inhomogenität der Buchenkronen wäre aus Sicht des Autors eine größere Anzahl an RBS-Pfaden je Einzelbaum wünschenswert. Dies ist insbesondere vor dem Hintergrund der Bestimmung der Aufarbeitungsintensität wichtig, da die Segmente/Knoten entlang der RBS-Pfade teils sehr starke Sprünge in den Durchmessern (z.T. >20 cm) (und damit im nutzbaren Holzvolumen) aufweisen und somit die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität im Bezug zum Einzelbaum ebenfalls stark springt. Diese Problematik könnte nur mit einer vergleichsweise hohen Anzahl an RBS-Pfaden im Datensatz entgegnet werden, wobei der hohe Aufnahmearbeit eines Einzelbaumes (für 3 Pfade > 2 Std.) immer bedacht werden muss. Allerdings ist in dem hier verwendeten Datensatz insbesondere in den stärkeren BHD-Bereichen die Anzahl der Untersuchungsobjekte relativ gering, sodass die Ergebnisse hier weniger belastbar erscheinen. Statt die Anzahl der RBS-Einzelbäume oder Pfade zu erhöhen, könnte sich zukünftig ggf. mit der Nutzung von Laserscanning-Verfahren eine Alternative zum RBS-Verfahren bieten. Hierbei besteht allerdings die Problematik der Interpretation der erfassten Laserpunkte, da diese durch Überlappung von Ästen und Blättern im Kronenbereich ein diffuses Abbild liefern. Zudem besteht anschließend die Schwierigkeit, aus den Punktwolken 3D-Körper zur Berechnung von Volumina abzuleiten. Eine Versuch, zumindest die Art und Intensität der Kronenverzweigung anhand von Laserscanning-Daten abzubilden, zeigt BAYER et. al. (2013). Hierbei werden in einem semi-automatischen Verfahren (automatische Erstinterpretation und händische Nachzeichnung der Hauptäste) Äste im Kronenbereich erfasst, wobei die stärkeren

Äste als einfache Linien (ohne Abholzigkeit) und der Feinstbereich als Wolken dargestellt werden. Über dieses oder ähnliche Verfahren lassen sich vermutlich zukünftig auf Grund der kompletten Erfassung der Buchenkrone und somit aller möglichen Nutzungspfade noch belastbarere ökonomische Berechnungen durchführen.

7.2 Analyse der Modellergebnisse

Wie bereits eingehend beschrieben ist die Aufarbeitung von Buchenkronen einer Vielzahl von Einflussfaktoren wie der Kronenmorphologie, der technischen Ausstattung der Maschine, dem Aufarbeitungsverfahren, den Bestandesverhältnissen u.v.m. unterlegen. Die Einflussstärke dieser Faktoren ist dabei grundsätzlich nicht gleichbleibend über den ausscheidenden Bestand hinweg, sondern unterscheidet sich vielmehr von Ast zu Ast bzw. von Entscheidungssituation zu Entscheidungssituation. Folglich kann von einer starken Situationsabhängigkeit und damit von Einzelfällen/-entscheidungen (vgl. Einleitung zu Kapitel 7) gesprochen werden. Die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität über die drei RBS-Pfade stellt letzten Endes eine Stichprobe mit Umfang $n = 3$ aller möglichen Einzelfallentscheidungen am Einzelbaum dar, welche auf Grund der beschriebenen Situationsabhängigkeit vergleichsweise stark streuen kann. Folglich sind bei den Modellauswertungen geringe Korrelationsmaße nicht als negativ zu bewerten, da sie letzten Endes systemimmanent sind und die logische Folge eines sehr komplexen und vielgestaltigen Entscheidungsproblems sind, welches sich nur schwerlich in eindeutigen Zusammenhängen erklären lässt. Für das Entscheidungsmodell müssen jedoch diese vielgestaltigen Vorgänge reduziert werden, um ein vereinfachtes Abbild des Aufarbeitungsvorganges zu schaffen bzw. um überhaupt eine ökonomische Bewertung zu ermöglichen. Insofern beinhaltet auch bspw. eine gemittelte ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen in der hochmechanisierten Holzernte auf der Basis stark streuender Ergebnisse eine hohe Aussagekraft.

Zur Validierung von Modellergebnissen sollten grundsätzlich wissenschaftlich anerkannte Ergebnisse mit einer hohen statistischen Belastbarkeit herangezogen werden. Die Problematik bei der Validierung dieser Studienergebnisse besteht jedoch darin, dass bspw. eine Prozesskostenanalyse mit zugehöriger videobasierter Zeitverbrauchsstudie in der hochmechanisierten Buchenkronenaufarbeitung bis dato noch nicht durchgeführt worden ist. Ein Vergleich ist somit de facto nicht möglich. Auch die Bestimmung einer ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen findet sich nicht in der dem Autor bekannten Literatur, sodass auch hier eine Validierung dieser Ergebnisse schwerlich möglich ist. Als einzige Alternative bot es sich daher an, anhand von Plausibilitätsüberlegungen und anderen Hilfsmitteln die Ergebnisse einer möglichst adäquaten Validierung zu

unterziehen. Aus diesen Gründen war die Wahl der Hiebsvolumenergebnisse als Validierungsgrundlage eine durchaus richtige Entscheidung. Zwar kann insbesondere bei den Ergebnissen der Prozesskostenanalyse nicht von einer vollständigen statistischen Unabhängigkeit⁴² gesprochen werden, jedoch war in diesem Fall ein anderes Vorgehen aus finanziellen Gründen nicht möglich. Auch die Tatsache, dass die Modellergebnisse für die hochmechanisierte Holzernte nur mit den Hiebsergebnissen aus lediglich zwei Beständen verglichen worden sind, grenzt die Aussagekräftigkeit ein. Ergänzend sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass es sich bei der ausschließlichen Betrachtung des Kronenholzes am Baum um insgesamt relativ geringe Holzvolumen handelt und sich somit Änderungen des Gesamtkronenholzvolumens in Folge unterschiedlicher Kronenlängen durch bspw. unterschiedliche Bonitäten oder waldbauliche Behandlungen sehr stark auswirken können. Insofern hat die Beschränkung auf die zwei gleichartigen Durchforstungsbestände auch durchaus positive Aspekte. Eine besondere Schwierigkeit der Validierung ergibt sich auch aus der Trennung zwischen Kronen- und Stammbereich. Wie bereits in Kapitel 6.3.1 beschrieben, liegen einzelne Sortimentstücke sowohl im Kronen- als auch im Stammbereich. Auch hier kann insbesondere bei gering dimensionierten Bäumen die (Nicht-) Zuordnung des Sortimentsvolumens zum Kronenbereich zu starken Überschätzungen (Unterschätzungen) führen.

Aus Sicht des Autors kann die Schätzung für die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen bei der hochmechanisierten Holzernte als sehr valide angesehen werden. Für diese Schätzung liegen auf Grund der umfangreichen Prozesskostenanalyse äußerst detaillierte und gesicherte Ausgangsinformationen vor, welche zudem eine mehrfache Fehlerprüfung durchlaufen haben. Diese Informationen wurden auch entsprechend in der ökonomischen Bewertung umgesetzt.

7.3 Verifizierung der Forschungshypothesen

Mit Hilfe des Entscheidungsmodells lassen sich eine Vielzahl von Auswertungen fahren, welche u.a. auch die Beantwortung der vorab gewählten Forschungshypothesen ermöglichen.

Bereits aus den ersten Ergebnissen (vgl. Kapitel 6.3) wird deutlich, dass die Aufarbeitungsintensität durchaus ökonomisch determiniert ist (*1. Forschungshypothese*). Selbst Veränderungen der Kosten-Erlös-Relationen im Rahmen des Varianstudiums (+/- 30 % der Basisvariante) führten in keinem Fall dazu (vgl. Kapi-

⁴² Es handelt es sich um dieselben Bäume, an welchen der für die ökonomische Bewertung in dem Entscheidungsmodell notwendige Zeitverbrauch gemessen wurde und gleichzeitig deren Nutzungsvolumen zur Validierung der Modellergebnisse herangezogen wurden.

tel 6.5.1), dass unter der Prämisse der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität die Buchenkronen vollständig aufgearbeitet werden sollten. Die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität lag hier zwischen 25 und 58 % des Kronenholzvolumens. Eine Reduktion der Erlöse bzw. Erhöhung der Kosten führte erwartungsgemäß zu stark steigenden Kronenrestholzmengen. Insofern wirken die ökonomischen Zusammenhänge stets plausibel und determinierend auf die optimale Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen. Die Erklärung findet sich in den Grenzkosten. Im Gegensatz zu den häufig verwendeten Durchschnittskosten zeichnen sich die Grenzkosten dadurch aus, dass sie mit sinkendem Astdurchmesser eine exponentielle Zunahme erfahren (vgl. Kapitel 3.4) und somit selbst sehr geringe, durchschnittliche Kostensätze relativ schnell zu sehr hohen Grenzkosten führen, sodass auch vergleichsweise hohe Erlöse damit zügig überstiegen werden.

Jeder Forstpraktiker wird sicher bestätigen können, dass die Kronenmorphologie auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität einen Einfluss hat (2. *Forschungshypothese*). Welche quantitativen Auswirkungen die Kronenverzweigung auf die entstehenden Kosten und damit die ökonomisch optimale Aufarbeitung hat, ist für einen Forstpraktiker kaum abschätzbar und diese Zusammenhänge sind auch nicht durch bisherige wissenschaftliche Lösungsansätze darstellbar (vgl. Kapitel 1.1). Das hier erstellte Entscheidungsmodell ist jedoch in der Lage diese Forschungshypothese zu bestätigen und erlaubt auch eine Quantifizierung der Einflussstärke der Kronenverzweigung auf verschiedene Ergebnisgrößen (vgl. bspw. Abbildung 29 und Abbildung 30). So nimmt die Aufarbeitungsintensität mit zunehmender Aggregation des Kronenholzes zu (Kronentyp 3/Wipfelschäftiger Kronentyp > Kronentyp 2/Besenförmiger Kronentyp > Kronentyp 1/Zwieselförmiger Kronentyp). Die Spanne der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität beträgt zwischen den betrachteten Kronentypen durchschnittlich über den gesamten BHD-Bereich beträchtliche 24 %. Zudem wird deutlich, dass der Kronentyp 3 mit deutlichem Abstand (18 %) die höchste ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität aufweist. Diese Ergebnisse decken sich mit den arbeitswissenschaftlichen Studienergebnissen von SCHORR (2000, S. 522) und GUGLHÖR (1994, S. 697), welche bei wipfelschäftigen Buchen den geringsten Zeitverbrauch und somit auch die geringsten Aufarbeitungskosten feststellen konnten.

Die Forschungshypothese, dass der Grenzzopf unabhängig vom BHD des aufzuarbeitenden Baumes ist, kann nicht bestätigt werden (3. *Forschungshypothese*). Die Kalkulationsergebnisse zeigen, dass bei der hochmechanisierten Holzernte die Grenzzöpfe mit steigendem BHD linear ansteigen. Der Hauptgrund ist aus Sicht des Autors in den zunehmend stärker dimensionierten Verzweigungen in der Krone zu finden, womit die Anzahl der SRV steigt. Die Folge sind sprunghafte Anstiege der Grenzkosten und entsprechend größere Grenzzöpfe. Interessant ist es in diesem Zusammenhang, dass die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität bei der hochmechanisierten Aufarbeitung unabhängig vom BHD ist. Somit

bleibt bei der hochmechanisierten Holzernte trotz steigenden Grenzzopfes das Verhältnis vom ökonomisch optimal nutzbaren Kronenholzvolumen zum gesamten Kronenholzvolumen annähernd gleich.

Der Frage, ob die Kosten einen stärkeren Einfluss auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität haben als die Erlöse, wird nachfolgend nachgegangen (4. *Forschungshypothese*). Für den Entscheider sollte grundsätzlich die Kostensensibilität ausgesprochen wichtig sein (vgl. Kapitel 1.1), denn insbesondere die Sprungkosten bei SRV können schnell zu hohen negativen Deckungsbeiträgen in der Aufarbeitung führen. Allerdings ist die Kostensensibilität nicht gleichbedeutend mit der Kostenhöhe. Aus den Ergebnissen wird deutlich, dass der Einfluss der Erlöse mindestens gleichstark und teilweise sogar stärker ist (vgl. Abbildung 41). Insgesamt zeigen sich jedoch nur marginale Unterschiede zwischen dem Einfluss der relativen Kosten- bzw. Erlösänderungen auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität.

Im Kontext der Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen ist aus betriebswirtschaftlichen (SPEIDEL 1984, S. 48ff) und ökologischen (RADEMACHER 2005, S. 288ff; KLINCK et al. 2011, S. 1; MEIWES 2010, S. 49) Gründen auf Grund der Langfristigkeit der forstlichen Produktion der Nährstoffnachhaltigkeit ein besonderes Gewicht zu geben. Bereits die konventionelle Nutzung bis zur Derbholz-Grenze kann zu erheblichen Nährstoffverlusten – allerdings nur auf nährstoffschwachen Standorten – führen (KLINCK et al. 2011, S. 2). Die letzte Forschungshypothese (5. *Forschungshypothese*) stellt in den Raum, dass steigende Erlöse zu einer hohen ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität und zu einer Nutzung von Nicht-Derbholz führen. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen jedoch, dass unter aktuellen ökonomischen Verhältnissen die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität bei der hochmechanisierten Holzernte (Maximum 56 % bei Kronentyp 3) (vgl. Abbildung 29) noch deutlich von einer Vollbaumnutzung entfernt ist. Zudem zeigen die Grenzzöpfe (vgl. Abbildung 37), dass die Nutzung des Nicht-Derbholzes nur in seltenen Einzelfällen gegeben ist. Im weit überwiegenden Teil der Fälle bleibt die Nutzung oberhalb der Derbholzgrenze und steigt zudem mit zunehmenden BHD an. Das Variantenstudium (vgl. Abbildung 40) bestätigt dieses trotz deutlich veränderter Kosten-Erlös-Verhältnisse. Aus diesem Grund kann die Forschungshypothese damit beantwortet werden, dass bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen die Nährstoffnachhaltigkeit nicht gefährdet ist.

8 Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren stieg in Deutschland der Verkaufserlös für geringwertige Sortimente auf Grund gestiegener Nachfrage deutlich an. Eine Möglichkeit auf entsprechend positive Marktbedingungen zu reagieren, ist die Bereitstellung zusätzlicher Holzvolumen durch die Intensivierung der Einzelbaumnutzung im Rahmen von Durchforstungen bzw. Endnutzungen. Hierbei stellt sich jedoch die Frage, welche Aufarbeitungsintensität unter den jeweils aktuellen Marktbedingungen aus Sicht eines gewinnmaximierenden Entscheiders ökonomisch optimal ist. Die Beantwortung einer solchen Frage ist keineswegs trivial, da ein Baum bzw. darüber hinaus die Krone ein komplexes Objekt darstellt und entsprechend viele, unterschiedliche Einflussfaktoren zur Bestimmung einer ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität zu berücksichtigen sind. Hierfür sind neben Informationen zu den Holzerlösen insbesondere detaillierte Kenntnisse über die Aufarbeitungskosten und deren Entstehungsprozesse nötig, welche wiederum abhängig von der baumartenspezifischen Verzweigung im Kronenraum sind. Die Baumart Buche, welche das zentrale Untersuchungsobjekt in dieser Dissertationsschrift darstellt, zeichnet sich durch einen ausgesprochen heterogenen und komplexen Kronenaufbau aus. So besitzt bspw. eine Buche mit einem BHD von 50 cm schätzungsweise zwischen 300 und 2000 Verzweigungen. Vor dem Hintergrund der Abnahme der Astdurchmesser zur Terminalknospe hin und unterschiedlicher Astlängen, ergeben sich unterschiedlichste Entscheidungssituationen. Die Ableitung von eindeutigen Entscheidungsregeln, wie sie für ein Modell des Operation Research notwendig sind, wird dadurch deutlich erschwert. Zudem wird die Umsetzung dadurch beeinträchtigt, dass adäquate Produktionsmodelle und entsprechende ökonomische Kalkulationsgrundlagen für solche Berechnungen nicht zur Verfügung stehen. Entsprechend schwierig gestaltet sich die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen.

Diese Dissertationsschrift greift die beschriebene Problematik auf und stellt erstmals ein ökonomisches Entscheidungsmodell vor, welches sensitiv auf veränderte ökonomische Rahmenbedingungen reagiert und anhand dessen die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen unter besonderer Berücksichtigung der baumartenspezifischen Kronenmorphologie bestimmt werden kann. Das Entscheidungsmodell zielt dabei darauf ab, nicht nur die ökonomischen Zusammenhänge der Kronenaufarbeitung zu erklären, sondern auch dem Entscheider bei der Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität bzw. des ökonomisch optimalen Grenzzopfes behilflich zu sein und ihn hinsichtlich der Kostenabhängigkeiten bei veränderten ökonomischen Rahmenbedingungen zu sensibilisieren.

Das Modell basiert methodisch auf dem Grenzkostenansatz und berechnet als Zielgröße den maximalen erntekostenfreien Holzerlös aus der Kronenaufarbeitung. Es ist auf die Aufarbeitungsprozesse in der Buchenkrone und auf die hochmechanisierte Holzernte reduziert. Gegenüber anderen wissenschaftlichen Modellen ist neben der Sensibilität gegenüber der Kosten- bzw. Erlös-Änderungen die Integration detaillierter Informationen über die Prozesskosten der hochmechanisierten Aufarbeitung und eines baumartenspezifischen Produktionsmodells hervorzuheben, welche ausschlaggebend für die Qualität und die Aussagekraft des Entscheidungsmodells sind.

Um die maßgeblichen Aufarbeitungsprozesse bei der hochmechanisierten Buchenkronenaufarbeitung zu identifizieren bzw. die damit verbundenen Prozesskosten zu quantifizieren, wurde im Rahmen dieser Dissertationsschrift eigens eine videobasierte Prozesskostenanalyse mit angeschlossener Zeitverbrauchsstudie durchgeführt. Hierdurch sind eine Reihe von neuen Erkenntnissen gewonnen worden, welche in das Entscheidungsmodell einfließen. So konnten bspw. die schnittrelevanten Verzweigungen (Astbasisdurchmesser des abzutrennenden Astes > 7 cm m.R.) als Kostentreiber identifiziert werden. Diese bedürfen allein zur Auftrennung eines zusätzlichen Zeitverbrauchs von rd. 24 Sekunden. Die Aufarbeitung der Fixlängen mit einer einzigen entsprechenden Verzweigungen beträgt dann den rd. fünffachen Zeitverbrauch gegenüber einer unverzweigten Fixlänge. Ein weiteres Ergebnis dieser Studie ist es, dass der Zeitverbrauch – ohne eine schnittrelevante Verzweigung – unabhängig vom Astdurchmesser für Kronenfixlängen gleich ist.

Um dem hohen Anspruch des Grenzkostenansatzes an das Produktionsmodell gerecht zu werden, sind auch hierbei neue Wege bestritten worden. Hierfür wird auf das Stichprobenverfahren des Randomized-Branch-Sampling (RBS) zurückgegriffen, welches im Rahmen dieser Dissertation erstmals Anwendung in einem ökonomischen Kontext findet. Es erlaubt zum einen die 163 Einzelbäume des RBS-Datensatzes über die mittleren Kronenastdurchmesser in drei Kronentypen einzuteilen, anhand derer sich der Einfluss der Kronenmorphologie auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität überprüfen lässt. Zum anderen ermög-

lichen die zu Grunde liegenden RBS-Pfade eine verfahrensspezifische, ökonomische Bewertung der Aufarbeitung und unter Verwendung eines rekursiv ablaufenden Optimierungsalgorithmus die Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität. Bedingt durch die diskrete Kostenfunktion der hochmechanisierten Kronenaufarbeitung in Folge der schnittrelevanten Verzweigungen sind iterative Optimierungsalgorithmen jedoch wenig effizient.

Mit diesem Modell können die zu Beginn gestellten Forschungshypothesen wie folgt verifiziert werden:

1. Die Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen in der hochmechanisierten Holzernte ist ökonomisch determiniert. Sie liegt bei den aktuell im südniedersächsischen Raum zu erwartenden Kosten-Erlös-Verhältnissen zwischen 32 und 56 % des Kronenholzvolumens. Selbst eine Erhöhung der Erlöse bzw. Senkung der Kosten um 30 % führen nicht zu einer vollständigen Nutzung des Kronenholzes.
2. Die Kronenmorphologie hat einen Einfluss auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität. Die Spanne der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität beträgt durchschnittlich zwischen den ausgewiesenen drei Kronentypen unter aktuellen Kosten-Erlös-Verhältnissen in der hochmechanisierten Kronenaufarbeitung 24 %.
3. Der ökonomisch optimale Grenzzopf steigt in der hochmechanisierten Holzernte mit dem BHD des ausscheidenden Baumes linear an. Die Ursache für den Anstieg des Grenzzopfes findet sich in der Zunahme stärkerer (schnittrelevanter) Verzweigungen im Kronenraum.
4. Der Einfluss der Aufarbeitungskosten und der Erlöse auf die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität ist annähernd gleich.
5. Selbst erheblich steigende Erlöse (+ 30 % gegenüber der aktuellen Erlössituation) führen nur in seltenen Fällen wie bspw. bei schwach dimensionierten Bäumen (BHD < 15 cm) zu einer Nutzung im Nicht-Derbholzbereich. Durch den Anstieg der Grenzzöpfe mit dem BHD ist viel eher ein vermehrter Anfall von Kronenrestholz zu erwarten, so dass die Nährstoffnachhaltigkeit nicht gefährdet wird.

Insgesamt wird durch dieses Modell deutlich, dass die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität keineswegs eine starre Größe ist, sondern dass sich diese stetig den verändernden Kosten-Erlös-Situationen anpasst. Unabdingbar für die Bestimmung ökonomisch optimaler Lösungen ist das Wissen um die ökonomischen Zusammenhänge der Kronenaufarbeitung. Daher sollten aus Sicht des Autors zukünftige Forschungsvorhaben vor allen dort ansetzen und die zugehörigen Aufarbeitungsprozesse analysieren, da hierbei der größte Erkenntnisgewinn hinsichtlich der Kostenentstehung zu erwarten ist. Denn die Kostensensibilität des Entscheiders ist ausschlaggebend für die Bestimmung einer ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen.

9 Literatur- und Quellenverzeichnis

- AGENTUR FÜR ERNEUERBARE ENERGIEN 2013: Holzenergie – Bedeutung, Potentiale, Herausforderungen. Renew's Spezial Holzenergie, Nr. 66, Berlin.
- AID INFODIENST VERBRAUCHERSCHUTZ, ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT E. V. (AID INFODIENST) 2007: Standortansprüche der wichtigsten Waldbaumarten. 1095/2007, 9., überarb. Aufl., Bonn.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT ENERGIEBILANZEN (AGEB) 2013: Energieverbrauch in Deutschland im Jahr 2012, Kühle Temperaturen bewirken leichten Anstieg des Primärenergieverbrauchs im Jahr 2012. Jahresbericht 2012.
- ARBEITSGEMEINSCHAFT FORSTLICHER LOHNUNTERNEHMER (AFL) 2012: AFL-Info 12/13. Richtpreise, Tarife, Kalkulationen, Adressen. AFL Niedersachsen e.V.
- ARNSWALD, H.J.V. 1951: Kronenform und Zuwachs der Buche. Allg. Forstzeitschr. 15, 174-175.
- BAMBERG, G., COENENBERG, A.G. 2000: Betriebswirtschaftliche Entscheidungslehre. 10., überarb. und erw. Aufl., Verlag Vahlen, München.
- BAYER, D., SEIFERT, S., PRETZSCH, H. 2013: Structural crown properties of Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* [L.]) in mixed versus pure stands revealed by terrestrial laser scanning. Trees, August 2013, Volume 27, Issue 4, 1035-1047.
- BEITZEN-HEINEKE, I. 2012: Gesprächsnotiz Telefonat. Geführt vom Verfasser am 24.07.2012, Göttingen.
- BELLMAN, R. 1959: Dynamic Programming. 2. printing, Princeton University Press.
- BIENECK, A. 2013a: Gesprächsnotiz Telefonat. Geführt vom Verfasser am 12.10.2012, Göttingen.

- BIENECK, A. 2013b: Elektronische Nachricht. Empfangen am 31.12.2013, Göttingen.
- BONT, L. 2005: Kundenorientierte Optimierung der Sortiments-Aushaltung bei der Holzernte, unter besonderer Berücksichtigung des Energieholzes. Dipl.-Arbeit an der ETH Zürich, Zürich.
- BÖRNER, M., GUERICKE, M., LEDER, B., NUTTO, L., STÄHR, F., WEINREICH, F. 2003: Erhebung qualitätsrelevanter Parameter am Einzelbaum – Aufnahmestandards für junge bis mittelalte Laubbölder als Grundlage wissenschaftlicher Untersuchungen. Forstarchiv 74(2003), 275-282.
- BÖSCH, B. 2010: Biomasseerfassung von Laub- und Nadelholz. Entwurf 1.1 vom 18.08.2010, unveröff.
- BRABÄNDER, H.D. 1994: Einführung in das Rechnungswesen für Forststudenten. 3. Aufl., Institut für Forstökonomie, Abteilung Betriebswirtschaftslehre, Universität Göttingen.
- BUNDESAMT FÜR NATURSCHUTZ (BFN) 2013: Potentielle natürliche Vegetation von Deutschland und Umgebung. Online: <http://www.floraweb.de/vegetation/pnv/> (gelesen am 09.10.2013).
- BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (BMELV) 2013: BWI2 – Das Wichtigste in Kürze. Flächen – Laubbaumanteil steigt. Online: <http://www.bundeswaldinventur.de/enid/347785714e2936029cc5ee9fc43f1c15,0/4f.html> (gelesen am 09.10.2013).
- CHURCHMANN, C.W., ACKOFF, R.L., ARNOFF, E.L. 1971: Operation Research – Einführung in die Unternehmensforschung. 5. Aufl., Wien/München.
- COENENBERG, A. G. 1997: Kostenrechnung und Kostenanalyse. 3., überarb. und erw. Aufl., Verlag Moderne Industrie, Landsberg/Lech.
- DEPENHEUER, O., MÖHRING, B. (HRSG.) 2010: Waldeigentum. Dimension und Perspektiven. Bibliothek des Eigentums, Bd. 8, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.
- DIETER, M. 2010: Produktion, Weiterverarbeitung und Handel von Holz aus gesamtwirtschaftlicher Perspektive. Eine quantitative Analyse der Forst- und Holzwirtschaft auf Grundlage sektoraler Statistiken. Habil.-Schrift, Georg-August Universität Göttingen, Göttingen.
- DIETER, M. 2013: Forstwirtschaft wieder auf Rekordniveau: Produktion und Gewinn deutlich gestiegen – Ergebnisse der Forstwirtschaftlichen Gesamtrechnung 2011. Holz-Zentralblatt, Band 139, Heft 2, 43.
- DUMMEL, K. 1975: Analyse und Gestaltung der Intensität im Forstbetrieb. Diss. an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i. Br., Freiburg.
- ENGESSER, H., CLAUS, V., SCHWILL, A. 1988: Duden Informatik. Ein Sachlexikon für Studium und Praxis. Herausgegeben vom Lektorat des B.I.-Wissenschaftsverlag. Dudenverlag, Mannheim/Wien/Zürich.

- ERMISCH, N., SEINTSCH, B., DIETER, M. 2013: Holzartengruppe Fichte 2003 bis 2011 konstant mit höchstem Erlösbeitrag. Analyse des TBN-Forst zum Erlösbeitrag der Holzartengruppen. AFZ-DerWald 23/2013, 6-9.
- ERNEUERBARE-ENERGIEN-GESETZ (EEG) vom 25. Oktober 2008 (BGBl. I S. 2074), das zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 20. Dezember 2012 (BGBl. I S. 2730) geändert worden ist.
- ERNEUERBARE-ENERGIEN-WÄRMEGESETZ (EEWärmeG) vom 07.08.2008 (BGBl. I S.1658), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 68 des Gesetzes vom 22. Dezember 2011 (BGBl. I S. 3044) geändert worden ist.
- FORBRIG, A. 2000: Konzeption und Anwendung eines Informationssystems über Forstmaschinen auf der Grundlage von Maschinenbuchführung, Leistungsnachweisen und technischen Daten. Diss. an der Technischen Universität München, Bericht Nr. 29/2000 des Kuratoriums für Waldarbeit und Forsttechnik, 213, Großumstadt.
- FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT FREIBURG (FVA FREIBURG) 2002: Benutzeranleitung Kalkulationsprogramm Holzernte. Entscheidungshilfe für Holzaufbereitung und -bringung, Holzvermarktung, Controlling und Waldbewertung. Version 6.1, Stand November 2002, Freiburg.
- FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT FREIBURG (FVA FREIBURG) 2004: Benutzeranleitung WEHAM, Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung. Freiburg.
- FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT FREIBURG (FVA FREIBURG) (HRSG.) 2011: Biomasse-Aufkommensprognose und Kreislaufkonzept für den Einsatz von Holzaschen in der Bodenschutzkalkung in Oberschwaben. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 87, Freiburg.
- FORSTLICHE VERSUCHSANSTALT FREIBURG (FVA FREIBURG) (HRSG.) 2013: Energieholz und Nachhaltigkeit. FVA-Fachtagung in Freiburg am 13. Dezember 2011. Berichte Freiburger Forstliche Forschung, Heft 94, Freiburg.
- GABLER 1984: Gabler-Wirtschafts-Lexikon. Bd. 3 G-K, 11., neubearb. Aufl., ungekürzte Wiedergabe d. zweibd. Orig.-Ausgabe, Gabler Verlag, Wiesbaden.
- GADOW, K. v. 2003: Waldstruktur und Wachstum. Beilage zur Vorlesung im Wintersemester 2003/2004. Verlag Universitätsdrucke Göttingen.
- GAFFREY, D., SABOROWSKI, J. 1999: RBS, ein mehrstufiges Inventurverfahren zur Schätzung von Baummerkmalen. I. Schätzung von Nadel- und Asttrockenmassen bei 66-jährigen Douglasien. Allg. Forst- u. J.-Ztg., 170. Jhrg., 10-11, 177-183.
- GREGOIRE, T. G., VALENTINE, H.T., FURNIVAL, G. M. 1995: Sampling methods to estimate foliage and other characteristics of individual trees. Ecol. 76 (4), 1181-1194.

- GREGOIRE, T. G., VALENTINE, H.T. 2008: Sampling strategies for natural resources and the environment. Chapman & Hall/CRC, Boca Raton, FL.
- GUGLHÖR, W. 1994: Durchforstung von Buchenbeständen mit einem Kranvollernter. AFZ-DerWald, 49. Jhrg., 13/1994, 695-698.
- HALLÉ, F., OLDEMAN, R.A.A., TOMLINSON, P.B. 1978: Tropical trees and Forests: An Architectural Analysis. Springer Verlag, Berlin, Heidelberg, New York.
- HEINEN, E. 1983: Betriebswirtschaftliche Kostenlehre: Kostentheorie u. Kostenentscheidungen. 6., verb. u. erw. Aufl., Gabler Verlag, Wiesbaden.
- HENGST, E. 1964: Der Kronenbau der Buche im Erzgebirge. Forstw. Cbl. 83 (1964), 79-87, Paul-Parey Verlag, Hamburg und Berlin.
- HEPPERLE, F. 2010: Prognosemodell zur Abschätzung des Regionalen Waldenergieholzpotentials auf der Grundlage forstlicher Inventur- und Planungsdaten unter Berücksichtigung ökologischer, technischer und wirtschaftlicher Nutzungseinschränkungen. Diss. an der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Freiburg.
- HESSEN-FORST 2008 (HRSG): Hessische Waldbaufibel, Grundsätze und Leitlinien zur naturnahen Wirtschaftsweise im hessischen Staatswald. Kassel.
- HILF, H.H. 1928: Die Arbeitsleistung im Hauungsbetrieb. Akte des Instituts für forstliche Arbeitswissenschaft Eberswalde. In: SPEIDEL 1952.
- HOMBURG, C. 2000: Quantitative Betriebswirtschaftslehre. Entscheidungsunterstützung durch Modelle. Mit Beispielen, Übungsaufgaben und Lösungen. 3., überarb. Aufl., Gabler Verlag, Wiesbaden.
- HOSTETTLER, M. 2003: Grenzkosten - Ökonomisch entscheiden (IV). Wald und Holz 12/03, 47.
- HUSMANN, K. 2013: Prognose ökonomisch optimaler Nutzungsintensität von Buchenkronen. Masterarbeit an der Abteilung für Forstökonomie und Forsteinrichtung, Georg-August-Universität Göttingen, unveröff., Göttingen.
- JACKE, H. 2003: Vorgabe-, Richt- und Planzeiten: Zur abschließenden Nutzung des erweiterten Sortentarifs (EST). Forst und Holz, 58. Jhrg., 720-722.
- JACKE, H. 2011: Der EST in Kurven. Rechnerische und graphische Ausgleichsmodell zu ausgewählten Richtzeittabellen des Erweiterten Sortentarifs. Institut für Forstliche Arbeitswissenschaft und Verfahrenstechnologie der Universität Göttingen, unveröff., Göttingen.
- JESSEN, R. J. 1955: Determining the fruit count on a tree by Randomized Branch Sampling. Biometrics, 11(1):99-109.
- KÄNDLER, G., BÖSCH, B. 2009: Biomassebestimmung an Waldbäumen – Methodische Grundlagen. FVA-Einblick, (2+3):6-12, Freiburg.
- KLINCK, U., MEESENBURG, H., SCHELER, B., FLECK, S., WAGNER, M., AHREND, B., MEIWES, K. J. 2011: Nährstoffbilanzen für Buchen-, Eichen-, Fichten- und Kiefernbestände bei verschiedenen Nutzungsinten-

- sitäten. In: Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen. 3. - 9. September 2011, Berlin.
- KRAHL-URBAN, J. 1953: Baumtypen bei Eichen und Buchen. Allg. Forstzeitschrift, 8. Jhrg., Nr. 20, 246-248.
- KRAHL-URBAN, J. 1955: Über Erziehungsmaßnahmen in Buchenbeständen. Allg. Forstzeitschrift, 10. Jhrg., Nr. 35/36, 401-406.
- KRAHL-URBAN, J. 1962: Buchen-Nachkommenschaften. Allg. Forst- u. Jagdztg. 133, 29-38.
- KRAMER, H., AKÇA, A. 1987: Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur. 2. erw. Aufl., J.D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt am Main.
- KRAMER, H. 1988: Waldwachstumslehre. Ökologische und anthropogene Einflüsse auf das Wachstum des Waldes, seine Massen- und Wertleistung und die Bestandessicherheit. Unter Mitarbeit von Hans-Achim Gussone u. Reinhard Schober. Paul-Parey Verlag, Hamburg und Berlin.
- KUBLIN, E. 2003: Einheitliche Beschreibung der Schaftform, Methoden und Programme, BDATPro. Forstw. Cbl. 122 (2003), S. 183-200, Paul-Parey Verlag, Hamburg und Berlin.
- LANDESFORSTEN RHEINLAND-PFALZ 1993: Ziele und Grundsätze einer ökologischen Waldentwicklung in Rheinland-Pfalz. AZ 10524-5001, Mainz.
- MALTAMO, M. 1997: Comparing Basal Area Diameter Distributions Estimated by Tree Species and for the Entire Growing Stock in a Mixed Stand. *Silva Fennica* 31(1), 53-65.
- MANTAU, U. 2012: Holzrohstoffbilanz Deutschland, Entwicklungen und Szenarien des Holzaufkommens und der Holzverwendung von 1987 bis 2015. 65, Hamburg.
- MATYSSEK, R., FROMM, J., RENNENBERG, H., ROLOFF, A. 2010: Biologie der Bäume. Von der Zelle zur globalen Ebene. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- MEIWES, K. J. 2010: Nährstoffe: Schiefelage im Waldboden? *Land & Forst*, 163. Jhrg., 30, 48-49.
- MEYER, H.A. 1941: A correction for a systematic error occurring in den application of logarithmic volume equation. *Penn State Forest School Resource* No 7. In: MALTAMO 1997.
- MÖHRING, B. 1994: Über ökonomische Kalküle für forstliche Nutzungsentscheidungen: ein Beitrag zur Förderung des entscheidungsorientierten Ansatzes der forstlichen Betriebswirtschaftslehre. J. D. Sauerländer's Verlag, Frankfurt a.M.
- MÖHRING, B. 1997: Betriebswirtschaftliche Probleme und Chancen. *AFZ/DerWald*, 52. Jhrg., Nr. 2, S. 67-71.
- MÖHRING, B., STAUPENDAHL, K., LEEFKEN, G. 2010: Modellierung und Bewertung natürlicher forstlicher Risiken mit Hilfe von Überlebensfunktionen. *Forst und Holz* 65, Heft 4, 26-30.

- MÖHRING, B., LEEFKEN, G., FINCKENSTEIN, B. G. v. 2010: Die wirtschaftliche Situation der Forstwirtschaft. 73-98. In: DEPENHEUER & MÖHRING 2010.
- MURPHY, G. 2012: Elektronische Nachricht zur VALMAX Optimierungssoftware. Empfangen am: 21.06.2012, Göttingen.
- MUBHOFF, O., HIRSCHAUER, N. 2011: Modernes Agrarmanagement. Betriebswirtschaftliche Analyse- und Planungsverfahren. 2., überar. und erweit. Aufl., Verlag Franz Vahlen, München.
- NAGEL, J. 2001: Skript Waldmesslehre. Fassung 27. Juni 2001, 55., unveröff., Göttingen.
- NAGEL, J., DUDA, H. A. A., HENTSCHEL, S. 2006: Entwicklung eines Decision Support Systems für die betriebliche und regionale Waldbauplanung (DSSW). Abschlussbericht, 176 S., Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen.
- NAGEL, J. 2009: Waldwachstumssimulation mit dem Java Software Paket TreeGross. Benutzeranleitung zum ForestSimulator Bwinpro 7. Vorläufiges Handbuch 10/21/10, Nordwestdeutsche Forstliche Versuchsanstalt, Göttingen.
- NÄSBERG, M. 1985: Mathematical Programming Models for Optimal Log Bucking. Linköping Studies in Science and Technology. Diss. No. 132, Department of Mathematics, Linköping University, S-58183 Linköping, Sweden.
- NEUGEBAUER, B. 2013: Analyse des Prozesses und der Genauigkeit der Harvestermessung in der hochmechanisierten Buchenernte. Ein Fallbeispiel aus dem Niedersächsischen Forstamt Münden. Bachelorarbeit an der Abteilung für Forstökonomie und Forsteinrichtung, unveröff., Göttingen.
- NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTEN (NLF) 2009: Merkblatt zur Pflege von Buchenbeständen. Nr. 33, unveröff., Wolfenbüttel.
- NIEDERSÄCHSISCHE LANDESFORSTEN (NLF) 2013: Auszug aus dem digitalen Bestandeslagerbuch für die Unterflächen 3221a2 und 3240b1 der Revierförsterei Mollenfelde im Forstamt Münden. Stichtag 01.01.2006, unveröff., Wolfenbüttel.
- NIEDERSÄCHSISCHES MINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (HRSG.) 1999: Die Rohholzsartierung in Niedersachsen. 2. aktual. Aufl., Stand August 1999, Hannover.
- NIKLAS, K.J. 1994: Plant allometry: the scaling of form and process. University of Chicago Press, Chicago.
- OEHMICHEN, K., DEMANT, B., DUNGER, K., GRÜNEBERG, E., HENNING, P., KROIHER, F., NEUBAUER, M., POLLEY, H., RIEDEL, T., ROCK, J., SCHWITZGEBEL, F., STÜMER, W., WELLBROCK, N., ZICHE, D., BOLTE, A. 2011: Inventarstudie 2008 und Treibhausgasinventar Wald. Sonderheft 343, vTI, Braunschweig.

- PAUSCH, R., PONITZ, K. 2002: Harvesterleistung und Hiebsbedingungen. *Forst & Technik* 4/2002, 10-14.
- PAUSCH, R. 2007: Starkholz und Energieholz. *Forsttechnische und wirtschaftliche Aspekte. AFZ-DerWald*, 62. Jahrgang, 14/2007, 746-748.
- PINHEIRO, J., BATES, D., DEBROY, S., SARKAR, D., R CORE TEAM (2014): Linear and nonlinear mixed effects modes. R package version 3.1-115. Online: <http://CRAN.R-project.org/package=nlme> (gelesen am 05.01.2014).
- PRETZSCH, H. 1992: Konzeption und Konstruktion von Wuchsmodellen für Rein- und Mischbestände. *Schriftenreihe der Forstwissenschaftlichen Fakultät, Universität München*, Nr. 115:332.
- PUMMALAINEN, J. 1998: Optimal Cross-cutting and Sensitivity Analysis for Various Log Dimension Constraints by Using Dynamic Programming Approach. *Scand. J. For. Res.*, 13: 74-82.
- RADEMACHER, P. 2005: Nährelementgehalte in den Kompartimenten wichtiger Wirtschaftsbaumarten und deren Bedeutung für die Reststoffverwertung. *Holz als Roh- und Werkstoff* (2005) 63:285-296.
- R DEVELOPMENT CORE TEAM 2013: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for statistical computing, Vienna, Austria. Online: <http://www.r-project.org/> (gelesen am 11.11.2013).
- REFA – VERBAND FÜR ARBEITSSUDIEN UND BETRIEBSORGANISATION E.V. (REFA), KURATORIUM FÜR WALDARBEIT UND FORSTTECHNIK (KWF) (Hrsg.) 1984: Anleitung für forstliche Arbeitsstudien. Datenermittlung. Arbeitsgestaltung. Mit Beispielen aus der forstlichen Praxis. Darmstadt.
- RICHTER, J. 1990: Kronentypen bei der Buche. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 161. Jhrg., 1, 11-15.
- RIEDEL, G. 1978: Deckungsbeitragsrechnung. wie aufbauen, wie nutzen. DBV Deutscher Betriebswirte-Verlag GmbH, Gernsbach.
- ROLOFF, A. 1983: Morphologie und Phänologie der Rotbuche (*Fagus sylvatica* L.) unter besonderer Berücksichtigung des Verzweigungssystems. Diplomarbeit am Institut für Forstbotanik, Göttingen.
- ROLOFF, A. 1986: Morphologie der Kronenentwicklung von *Fagus sylvatica* L. (Rotbuche) unter besonderer Berücksichtigung möglicherweise neuartiger Veränderungen. *Berichte des Forschungszentrums Waldökosysteme/Waldsterben*, Bd. 18, Göttingen.
- ROSE, S. 2013: Prozessanalyse der hochmechanisierten Buchenkronenaufarbeitung. Bachelorarbeit an der Abteilung für Forstökonomie und Forsteinrichtung, unveröff., Göttingen.
- RUMPF, S., NAGEL, J., SCHMIDT, M. 2011: Biomasseschätzfunktionen von Fichte, Kiefer, Buche, Eiche und Douglasie für Nordwestdeutschland. Forschungsvorhaben: Möglichkeiten und Grenzen der Vollbaumnutzung. Ergebnisbericht (FKZ: 22015407). Fachagentur für nachwachsende Rohstoffe, Göttingen.

- SABOROWSKI, J., GAFFREY, D. 1999: RBS, ein mehrstufiges Inventurverfahren zur Schätzung von Baummerkmalen. II. Modifizierte RBS-Verfahren. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 170. Jhrg., 12, 223-227.
- SCHMALENBACH, E. 1956: *Kostenrechnung und Preispolitik*. 7., erw. u. verb. Aufl., Westdeutscher Verlag, Köln und Opladen.
- SCHMIDT, A. 2001: *Prognosemodelle für ausgewählte Holzqualitätsmerkmale wichtiger Baumarten*. Diss., Göttingen.
- SCHORR, M. 2000: Der Einfluss von Starkkästen und Zwieseln auf die Leistung von Harvestern bei der Laubschwachholzernte. *Forst und Holz*, 55. Jhrg., 520-522.
- SCHÖPFER, W., DAUBER E. 1989: *Bestandessortentafeln '82/85*. Forstl. Versuchs- und Forschungsanstalt Baden-Württemberg, Freiburg.
- SCHÖPFER, W., KÄNDLER, G., STÖHR, D. 2004: Simulation einer wertoptimalen Holzeinteilung bei Vollerntereinsatz. *Forst und Holz*, 59. Jhrg., 263-268.
- SLOBODA, B., GAFFREY, D., MATSUMURA, N. 1997: Erfassung individueller Baumschaffformen und ihrer Dynamik durch Spline-Funktionen und Verallgemeinerung durch lineare Schaffformmodelle. *Allg. Forst- u. J.-Ztg.*, 169. Jhrg., 2, 29-38.
- SÖLLNER, F. 2012: *Die Geschichte des ökonomischen Denkens*. 3. Aufl., Springer-Verlag, Heidelberg Berlin.
- SPEIDEL, G. 1952: *Das Stückmassesgesetz und seine Bedeutung für den internationalen Leistungsvergleich bei der Forstarbeit*. Schriftenreihe des Instituts für forstliche Arbeitswissenschaft (Iffa), Schrift 5, Gesellschaft für forstliche Arbeitswissenschaft e. V., Reinbeck.
- SPEIDEL, G. 1983: *Forstliche Betriebswirtschaftslehre*. 2., völlig Neubearb. Aufl., Paul Parey Verlag, Hamburg, Berlin.
- SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.) 2013a: *Gabler Wirtschaftslexikon*. Stichwort: *Stufenweise Fixkostendeckungsrechnung*. Online: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/4446/stufenweise-fixkostendeckungsrechnung-v5.html> (gelesen am 11.11.2013).
- SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.) 2013b: *Gabler Wirtschaftslexikon*. Stichwort: *Grenzkosten*. Online: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/1378/deckungsbeitragsrechnung-v6.html> (gelesen am 11.11.2013).
- SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.) 2013c: *Gabler Wirtschaftslexikon*, Stichwort: *Entscheidungstheorie*. Online: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/56961/entscheidungstheorie-v8.html> (gelesen am 02.12.2013).
- SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.) 2014a: *Gabler Wirtschaftslexikon*, Stichwort: *Entscheidungsbaum*. Online: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/56443/entscheidungsbaum-v10.html> (gelesen am 24.01.2014).
- SPRINGER GABLER VERLAG (Hrsg.) 2014b: *Gabler Wirtschaftslexikon*. Stichwort: *Dynamische Optimierung*. Online: <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/>

- Archiv/55397/dynamische-optimierung-v6.html (gelesen am 24.01.2014).
- SPRUGEL, D.G. 1983: Correcting for Bias in Log-Transformed Allometric Equations. *Ecology*, Vol. 64, No. 1 (Feb. 1983), 209-210.
- STATISTISCHES BUNDESAMT 2013: Erzeugerpreise der Produkte des Holzeinschlages. Online: https://www.destatis.de/DE/ZahlenFakten/GesamtwirtschaftUmwelt/Preise/PreisindizesLandForstwirtschaft/Tabellen/ErzeugerpreiseForstwirtschaft.html?cms_gtp=146562_list%253D1%2526146560_slot%253D2&https=1 (gelesen am 16.05.2013).
- STEPAN, A., FISCHER, E.O. 2009: Betriebswirtschaftliche Optimierung. Einführung in die quantitative Betriebswirtschaftslehre. 8., verb. und erw. Aufl., Oldenbourg Verlag, München.
- THÜNEN, J.H. VON 1910: Der isolierte Staat in Beziehung auf Landwirtschaft und Nationalökonomie. 3. Aufl., Verlag Gustav Fischer, Jena.
- TROTHA, W.-T. v., VOLCKENS, F., MÖHRING, B. 2013: Ergebnisse des Wirtschaftsjahres 2012 aus dem BB-Forstbetriebsvergleich. *AFZ-DerWald* 23/2013, 18-20.
- UMWELTBUNDESAMT 2013: Primärenergieverbrauch nach Energieträgern und Anteil erneuerbarer Energien. Stand Februar 2013. Online: <http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de/umweltdaten/public/theme.do?nodeIdent=2848> (gelesen am 16.05.2013).
- VALENTINE, H. T., HILTON, S. J. 1997: Sampling oak foliage by the randomized-branch method. *Can. J. For. Res.* 7, 295-298.
- VALENTINE, H. T., TRITTON, L. M., FURNIVAL, G. M. 1984: Subsampling trees for biomass, volume, or mineral content. *For. Sci.* 30, 673-681.
- WARTON, D.I., DUURSMA, R.A., FALSTER, D.S., TASKINEN, S. (2012): smatr 3 – an R package for estimation and inference about allometric lines methods in ecology and evolution, 3(2), 257-259.
- WEIMAR, H., SEINTSCH, B. 2012: Laubholz in Deutschland – Auf welchen Markt trifft das Potential?, In: FACHAGENTUR FÜR NACHWACHSENDE ROHSTOFFE (FNR) 2012: Stoffliche Nutzung von Laubholz. Herausforderung für eine zukunftsfähige Holzverwendung. *Gülzower Fachgespräche Band 40*, 11, Bonn.
- WEST, G. B., BROWN, J. H. 1999A: The fourth dimension of life: Fractal geometry and allometric scaling of organisms. *Science*, Vol 284, 4. June 1999, 1677-1679.
- WEST, G. B., BROWN, J. H., ENQUIST, B. J. 1999B: A general model for the structure and allometry of plant vascular systems. *Nature*, Vol 400, 12 August 1999, 664-667.
- WIESNER, J. 1907: Der Lichtgenuss der Pflanzen. Photometrische und Physiologische Untersuchungen mit besonderer Rücksichtnahme auf Lebensweise,

Geographische Verbreitung und Kultur der Pflanzen. Verlag Wilhelm Engelmann, Leipzig.

WÖHE, G., DÖRING, U. 2000: Einführung in die allgemeine Betriebswirtschaftslehre. 20., überarb. Aufl., Verlag Franz Wahlen, München.

ZIEGELER, M. 2008: Sicherung der forstbetrieblichen Wertschöpfung aus dem Verkauf stehenden Holzes an selbstwerbende Unternehmen. Diss., Universitätsverlag Göttingen.

10 Anhang

3			Kummulierter Deckungsbeitrag aktueller u. nachfolgender Aufarbeitungsschritte mit positiven Aufarbeitungsentscheidungen
	2		Deckungsbeitrag des aktuellen Aufarbeitungsschrittes mit positiver Aufarbeitungsentscheidung
		1	Kummulierter Deckungsbeitrag nachfolgender Aufarbeitungsschritte mit positiven Aufarbeitungsentscheidungen
-1	-1	X	Negative Aufarbeitungsentscheidung und Astende
3.1.1			Anzahl der Aufarbeitungsschritte bzw. der Verzweigungen


Anhang 1: Legende für die Abbildung 9

Aufnahmeblatt: stehendes Holz			FoA: Münden		RFö: Mollenfelde		Abt.		Blattnr.	
Aufnahmegruppe										
Baumnr.	Bhd		Höhen [m]			Kronentyp (X)				
	von	bis	Gesamt	Kr.-ansatz	Zwieselh.	Wipfel	Besen	Zwiesel	Sek.-Kr.	


Kronensatz:
die Höhe des untersten lebenden (grünen) Primärastes im Mark (keine Klebäste, Feinäste etc.)

Zwiesel:
schwächerer Trieb hat mind. 75% der Stärke und 75% der Länge des Stärkeren

Wipfelschäftige Krone:
- nahezu waagrecht abstehende Äste, Astwinkel circa 65° bis 90°
- durchgehende Schaftachse



Besenförmige Krone:
- durchgehende Schaftachse bis ¼ der Baumhöhe
- Astablaufwinkel unter 65°



Zwieselige Krone:
- Zwiesel am Stamm in den unteren ¼ der Baumhöhe
- spitze Astablaufwinkel von etwa 10°

Anhang 2: Aufnahmeblatt für die Stehendaufnahme im Rahmen der Prozessanalyse in der Revierförsterei Mollenfelde, Niedersächsisches Forstamt Münden

Aufnahmeblatt: liegendes Holz

Forst: Münden

Rfö: Mollenfelde

Abt. 3240

Reale Aushaltung (S = Sortiment / L = Länge [m] (ungerundet, auf cm genau) / Dm = Durchmesser [cm m. R.])

Baumnr.	S1	L1	Dm1	S2	L2	Dm2	S3	L3	Dm3	S4	L4	Dm4	S5	L5	Dm5	S6	L6	Dm6	S7	L7	Dm7	S8	L8	Dm8	S9	L9	Dm9	S10	

Sortimente: StH = Stammholz, KS = Kronenstück

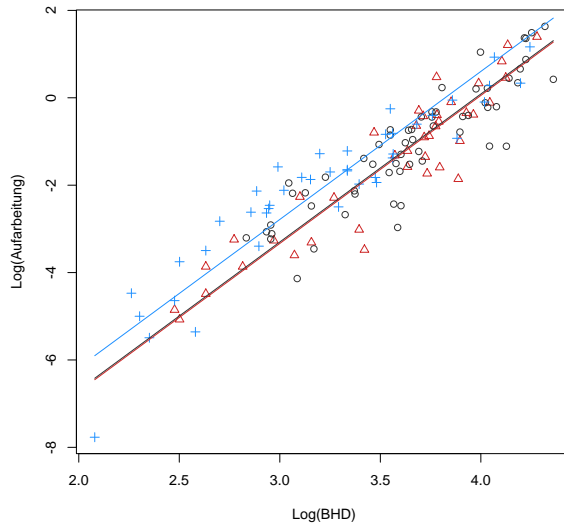
Anhang 3: Aufnahmeblatt für die Liegendaufnahme im Rahmen der Prozessanalyse in der Revierförsterei Mollenfelde, Niedersächsisches Forstamt Münden
 (S: Sortimentsbezeichnung; L: Sortimentslänge [m]; Dm: Durchmesser [cm m.R.])



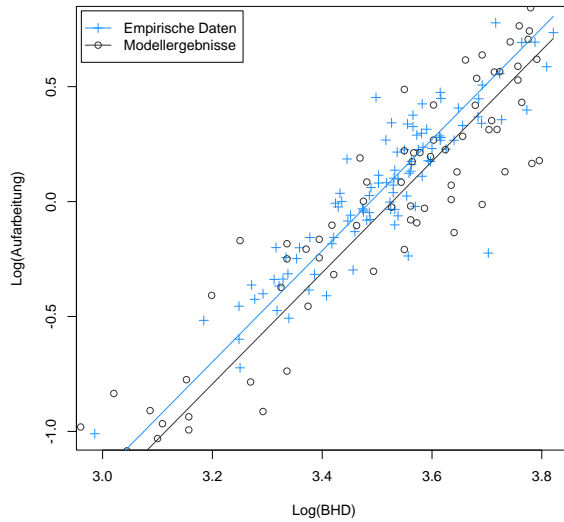
Anhang 4: Aufarbeitungsreihenfolge der im Rahmen der Prozesskostenanalyse vermessenen Sortimente (2, 6, 3, 7, 4, 8) (Quelle: Eigene Aufnahme)

1	Deckungsbeitrag des aktuellen Aufarbeitungsschrittes mit positiver Aufarbeitungsentscheidung
2	Kummulierter Deckungsbeitrag nachfolgender Aufarbeitungsschritte mit positiven Aufarbeitungsentscheidungen
-2	X Negative Aufarbeitungsentscheidung und Astende
7	Anzahl rekursiver Rechenschritte

Anhang 5: Legende zu Abbildung 24.



Anhang 6: Doppelt logarithmierte Darstellung der ökonomisch optimal nutzbaren Kronenholzvolumen für die hochmechanisierte Kronenaufarbeitung.



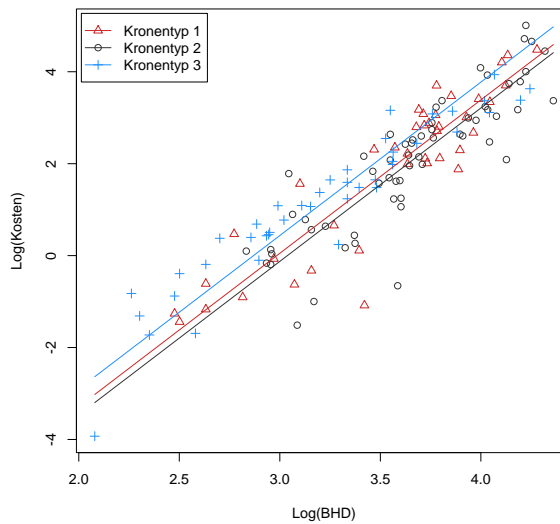
Anhang 7: Doppelt logarithmierte Darstellung des nutzbaren Einzelbaumholzvolumens für die hochmechanisierte Aufarbeitung getrennt nach empirischen Daten und den Ergebnissen des Entscheidungsmodells

$$K_{\text{KRT } 1, \text{HM}} = e^{-9,960 + \ln(\text{BHD}) * 3,337} * 1,0066 \quad R^2 = 0,83; p = 4,44 * 10^{-16}$$

$$K_{\text{KRT } 2, \text{HM}} = e^{-10,137 + \ln(\text{BHD}) * 3,337} * 1,0066 \quad R^2 = 0,76; p < 2,22 * 10^{-16}$$

$$K_{\text{KRT } 3, \text{HM}} = e^{-9,574 + \ln(\text{BHD}) * 3,337} * 1,0066 \quad R^2 = 0,90; p < 2,22 * 10^{-16}$$

Anhang 8: Funktionen für die Aufarbeitungskosten (K) [EUR] für die hochmechanisierte Aufarbeitung von Buchenkronen in Abhängigkeit vom BHD [cm], getrennt nach Kronentypen (KRT).



Anhang 9: Doppelt logarithmierte Darstellung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungskosten für die hochmechanisierte Kronenaufarbeitung.

$$E_{\text{KRT 1, HM}} = e^{-9,584 + \ln(\text{BHD}) * 3,387} * 1,0154$$

$$R^2 = 0,86; p < 2,22 * 10^{-16}$$

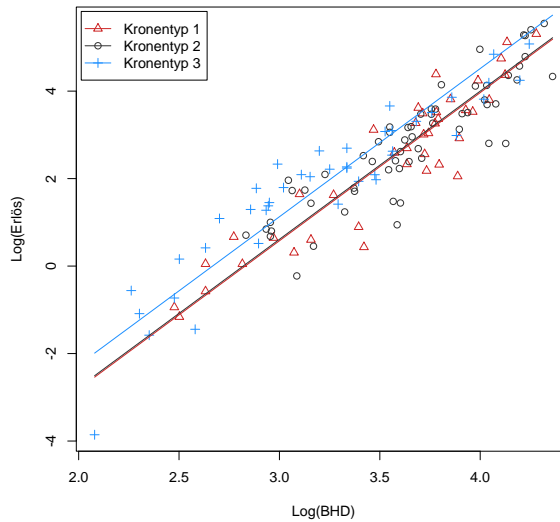
$$E_{\text{KRT 2, HM}} = e^{-9,550 + \ln(\text{BHD}) * 3,387} * 1,0154$$

$$R^2 = 0,79; p < 2,22 * 10^{-16}$$

$$E_{\text{KRT 3, HM}} = e^{-9,034 + \ln(\text{BHD}) * 3,387} * 1,0154$$

$$R^2 = 0,87; p < 2,22 * 10^{-16}$$

Anhang 10: Funktionen für den Erlös (E) [EUR] von Buchenkronen bei der hochmechanisierten Aufarbeitung in Abhängigkeit vom BHD [cm] und getrennt nach Kronentypen (KRT).



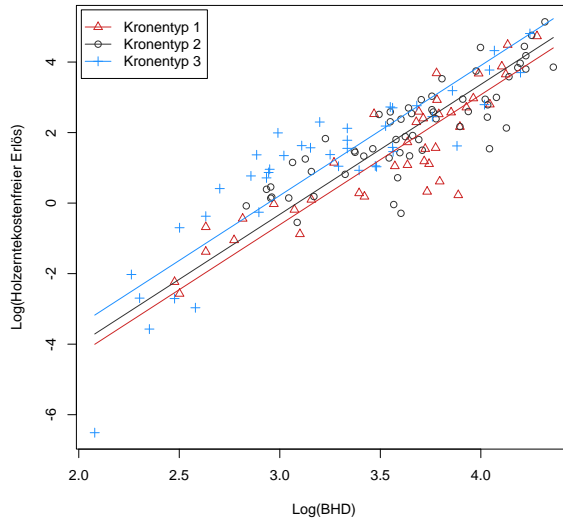
Anhang 11: Doppelt logarithmierte Darstellung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungserlöse für die hochmechanisierte Kronenaufarbeitung.

$$\text{EKFE}_{\text{KRT 1, HM}} = e^{-11,666 + \ln(\text{BHD}) * 3,684} * 1,0409 \quad R^2 = 0,79; p = 1,93 * 10^{-14}$$

$$\text{EKFE}_{\text{KRT 2, HM}} = e^{-11,373 + \ln(\text{BHD}) * 3,684} * 1,0409 \quad R^2 = 0,71; p < 2,22 * 10^{-16}$$

$$\text{EKFE}_{\text{KRT 3, HM}} = e^{-10,838 + \ln(\text{BHD}) * 3,684} * 1,0409 \quad R^2 = 0,78; p = 7,32 * 10^{-15}$$

Anhang 12: Funktionen für den holzerntekostenfreien Erlös (EKFE) [EUR] von Buchenkronen bei hochmechanisierter Aufarbeitung in Abhängigkeit vom BHD [cm] und getrennt nach Kronentypen (KRT).



Anhang 13: Doppelt logarithmierte Darstellung der ökonomisch optimalen holzerntekostenfreien Erlös für die hochmechanisierte Kronenaufarbeitung.

Erlös [EUR/Fm]	Koeffizient	Wert	Standardfehler	t-Wert
35	a	6,621959	0,4792	13,81
40	a	7,344735	0,5291	13,88
45	a	7,973903	0,5729	13,91
50	a	8,643227	0,6198	13,94
55	a	9,252338	0,6626	13,96
60	a	9,834466	0,7037	13,97
65	a	1,375240	0,7419	13,98
	b	-0,602074	0,0141	-42,67
AIC	-315,098	Stand.-Fehler d. Residuen		0,0042
BIC	-296,180	Funktion		$AI_i = a_i \cdot K^b$

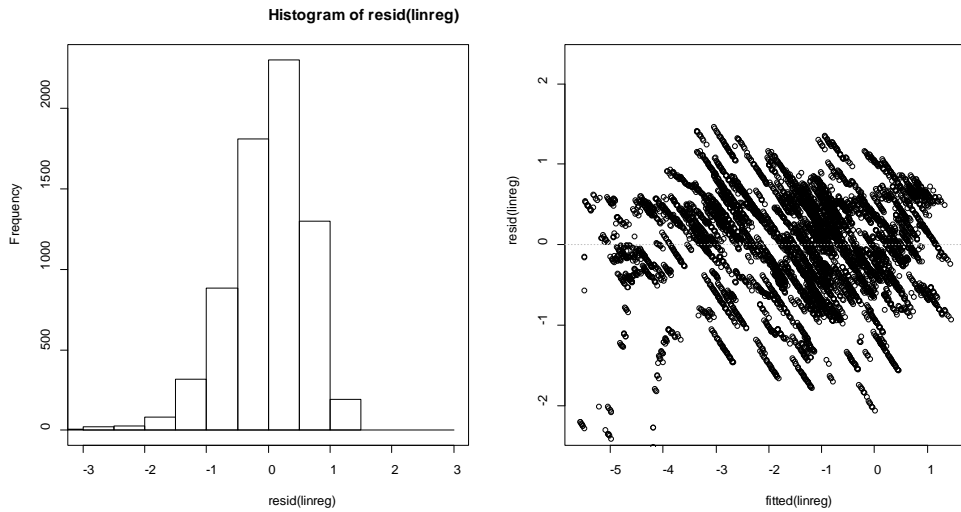
Anhang 14: Modellzusammenfassung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen (AI) bei verschiedenen Erlössituationen (i) in Abhängigkeit von den Kosten (K). Die Funktionen sind gültig für die hochmechanisierte Holzernte und beziehen sich dabei auf die Kostenspanne von 122 bis 227 EUR/Fm bzw. nur auf den Kronentyp 2.

Kosten [EUR/MAS]	Koeffizient	Wert	Standardfehler	t-Wert
122	a	0,0282731	0,0017	15,99
140	a	0,0261595	0,0016	15,97
157	a	0,0246317	0,0015	15,95
175	a	0,0228465	0,0014	15,92
192	a	0,0216468	0,0014	15,59
210	a	0,0203966	0,0013	15,85
227	a	0,0194513	0,0012	15,82
	b	0,7214853	0,0012	46,23
AIC	-317,6112	Stand.-Fehler d. Residuen		0,0036
BIC	-298,693	Funktion		$AI_i = a_i$ * E b

Anhang 15: Modellzusammenfassung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen (AI) bei verschiedenen Kostensätzen (i) in Abhängigkeit von den Erlösen (E). Die Funktionen sind gültig für die hochmechanisierte Holzernte und beziehen sich dabei auf die Erlösspanne von 35 bis 65 EUR/Fm bzw. nur auf den Kronentyp 2.

Variable	Schätzwert	Standardfehler	t-Wert	p-Wert
$\ln(\beta)$	-12,25380	0,065	-187,426	$<2*10^{-16}$
α	3,06320	0,016	190,682	$<2*10^{-16}$
Kosten: 122				
140	-0,06812	0,027	-2,491	0,012
157	-0,12363	0,027	-4,502	$6,83*10^{-6}$
175	-0,18008	0,028	-6,525	$7,30*10^{-11}$
192	-0,21794	0,028	-7,848	$4,86*10^{-15}$
210	-0,27161	0,028	-9,725	$<2*10^{-16}$
227	-0,29263	0,028	-10,400	$<2*10^{-16}$
Erlös: 35				
40	0,04526	0,029	1,553	0,120
45	0,11561	0,029	3,992	$6,61*10^{-5}$
50	0,18198	0,029	6,326	$2,68*10^{-10}$
55	0,24069	0,029	8,406	$<2*10^{-16}$
60	0,29451	0,029	10,320	$<2*10^{-16}$
65	0,34200	0,028	12,019	$<2*10^{-16}$
Kronentyp: 1	-0,09229	0,018	-5,028	$5,08*10^{-7}$
Kronentyp: 2				
Kronentyp: 3	0,34133	0,019	17,830	$<2*10^{-16}$
Anzahl der Beobachtungen		6940		
λ		1,13		
R^2		0,85		
Freiheitsgrade		6924		

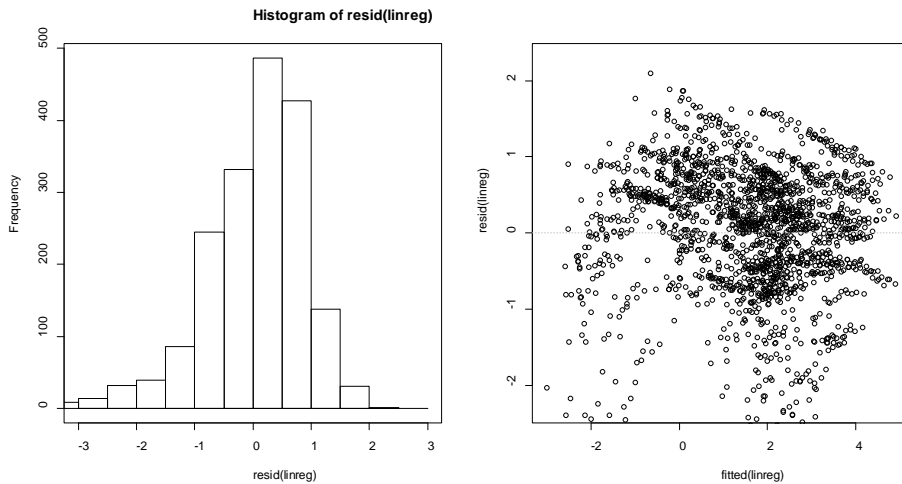
Anhang 16: Zusammenfassung des Schätzmodells des nutzbaren Kronenholzvolumens bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität für die hochmechanisierte Holzerte für unterschiedliche Kosten- und Erlösverhältnisse bzw. Kronentypen. Die Kosten gehen in der Einheit [EUR/MAS] bzw. die Erlöse in [EUR/Fm] in die Schätzung ein.



Anhang 17: Residuen des ln-linearen Modells des nutzbaren Kronenholzvolumens bei ökonomischer optimaler Aufarbeitungsintensität in der hochmechanisierten Holzernte für verschiedene Kosten- und Erlössituationen bzw. Kronentypen.

Variable	Schätzwert	Standardfehler	t-Wert	p-Wert
$\ln(\beta)$	-10,2877	0,098	-105,65	$<2*10^{-16}$
α	3,23653	0,024	134,521	$<2*10^{-16}$
Kosten: 122				
140	-0,10822	0,041	-2,642	0,00826
157	-0,20878	0,041	-5,077	$3,94*10^{-7}$
175	-0,30508	0,041	-7,381	$1,76*10^{-13}$
192	-0,36440	0,042	-8,762	$<2*10^{-16}$
210	-0,45389	0,042	-10,851	$<2*10^{-16}$
227	-0,48385	0,042	-11,481	$<2*10^{-16}$
Erlös: 35				
40	0,26295	0,044	6,024	$1,69*10^{-9}$
45	0,56981	0,043	13,138	$<2*10^{-16}$
50	0,79141	0,043	18,368	$<2*10^{-16}$
55	0,99764	0,043	23,265	$<2*10^{-16}$
60	1,18504	0,043	27,725	$<2*10^{-16}$
65	1,35435	0,043	31,781	$<2*10^{-16}$
Kronentyp: 1	-0,30977	0,027	-11,268	$<2*10^{-16}$
Kronentyp: 2				
Kronentyp: 3	0,39922	0,029	13,924	$<2*10^{-16}$
Anzahl der Beobachtungen		6940		
λ		1,13		
R^2		0,75		
Freiheitsgrade		6924		

Anhang 18: Zusammenfassung des Schätzmodells des erntekostenfreien Erlöses (EKFE) bei ökonomisch optimaler Aufarbeitungsintensität bei der hochmechanisierten Holzernte für unterschiedliche Kosten- und Erlössituationen bzw. Kronentypen. Die Kosten gehen in der Einheit [EUR/MAS] bzw. die Erlöse in [EUR/Fm] in die Schätzung ein.



Anhang 19: Residuen des ln-linearen Modells des holzerntkostenfreien Erlöses (EKFE) bei ökonomischer optimaler Aufarbeitungsintensität in der hochmechanisierten Holzernte unter verschiedenen Kosten- und Erlössituationen bzw. Kronentypen.

Holzerntekostenfreier Erlös				
[EUR/Krone]				
Kostenänderung	Spanne	Kronentyp	Kronentyp	Kronentyp
[%]		1	2	3
- 20 %	5,77	5,61	7,76	11,38
- 10 %	5,07	4,93	6,82	10,00
0	4,84	4,71	6,51	9,55
10 %	4,39	4,26	5,90	8,65
20 %	3,88	3,77	5,22	7,65

Anhang 20: Holzerntkostenfreie Erlöse für die hochmechanisierte Holzernte in Abhängigkeit vom Kronentyp bei unterschiedlichen Kostenvarianten. Die Basisvariante berücksichtigt Maschinenarbeitskosten von 175 EUR/MAS und einen Holzerlös von 50 EUR/Fm.

Holzerntekostenfreier Erlös				
[EUR/Krone]				
Erlösänderung	Spanne	Kronentyp	Kronentyp	Kronentyp
[%]		1	2	3
- 20 %	2,83	2,75	3,80	5,58
- 10 %	3,76	3,65	5,05	7,41
0	4,84	4,71	6,51	9,55
10 %	5,62	5,46	7,56	11,08
20 %	7,12	6,91	9,56	14,03

Anhang 21: Holzerntekostenfreie Erlöse für die hochmechanisierte Holzernte in Abhängigkeit vom Kronentyp bei unterschiedlichen Erlösvarianten. Die Basisvariante berücksichtigt Maschinenarbeitskosten von 175 EUR/MAS und einen Holzerlös von 50 EUR/Fm.

Diese Dissertationsschrift geht der Frage der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität von Buchenkronen bei der hochmechanisierten Aufarbeitung nach. Hierbei gilt es denjenigen Punkt innerhalb des Aufarbeitungsprozesses zu identifizieren, an welchem entsprechend der Zielvorstellung des Entscheiders ein ökonomisch optimales Verhältnis von Input und Output gegeben ist. Neben den ökonomischen Grundlagen der Bestimmung der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität werden in dieser Arbeit die notwendigen Prozesse der hochmechanisierten Aufarbeitung von Buchenkronen anhand einer video-basierten Prozesskostenanalyse detailliert beschrieben. Diese Kenntnisse finden Anwendung in einem ökonomischen Entscheidungsmodell, mit welchem bei 163 Rotbuchen, die nach dem Randomized Branch Sampling (RBS)-Verfahren aufgenommen sind, exemplarisch die ökonomisch optimale Aufarbeitungsintensität bestimmt wird. Das Modell ermöglicht zudem die Sensitivität der ökonomisch optimalen Aufarbeitungsintensität hinsichtlich unterschiedlicher Kosten-Erlös-Relationen bzw. Kronentypen zu verdeutlichen.