

Technische Universität München
Department für Biogene Rohstoffe und Technologie der Landnutzung
Fachgebiet Technik im Pflanzenbau und Landschaftspflege

Bewertung von Scheitholzproduktionsverfahren unter arbeitswissenschaftlichen, energetischen und ökonomischen Aspekten

Alexander Höldrich

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktors der Agrarwissenschaften (Dr. agr.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. M. Faulstich
Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr. agr., Dr. agr. habil. H. Auernhammer
2. Univ.-Prof. Dr. rer. silv., Dr. rer. silv. habil., Dr. h. c. G. Wegener

Die Dissertation wurde am 22.11.2006 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 11.03.2007 angenommen.

Vorwort

Eine große Unsicherheit beim Handel mit Scheitholz aufgrund fehlender aktueller Daten und der jährlich auftretende Brennholzangel, der nach wie vor wichtigsten Rohstoffquelle der nachwachsenden Rohstoffe, waren die Gründe für eine detaillierte wissenschaftliche Untersuchung in der vorliegenden Arbeit.

Besonders danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Dr. habil Hermann Auernhammer, Fachgebiet Technik in Pflanzenbau, der mir beratend zur Seite stand und mich als externen Doktoranden annahm.

Für die Durchsicht der Rohfassung und die Bereitschaft die Zweitkorrektur durchzuführen, danke ich Herrn Prof. Dr. Dr. habil Drs. h.c. Gerd Wegener vom Lehrstuhl für Holzkunde und Holztechnik, ebenso Herrn Prof. Dr.-Ing. Martin Faulstich, Lehrstuhl für Technologie Biogener Rohstoffe, der die Prüfungskommission leitete.

Speziell bedanken möchte ich mich bei Herrn Dr. Hans Hartmann, Sachgebietsleiter Festbrennstoffe am Technologie- und Förderzentrum (TFZ), dessen unermüdlicher Einsatz bei Überprüfung meiner Tätigkeiten und Korrektur der Arbeit und wissenschaftliches Know how im Bereich Energie aus Biomasse wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beitrug.

Weiterer Dank gilt der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (LWF), hier besonders Herrn Dr. Gunther Ohrner, Herrn Dr. Stefan Wittkopf und Herrn Wilfried Sommer für die gelungene Zusammenarbeit und der Beratung im Bereich forstlicher Zeitstudien.

Einen Baustein im Bereich der Arbeitsschwereuntersuchung trug Herr Thomas Decker bei, dessen Diplomarbeit ich betreute.

Zur Hilfe kamen mir auch Herr Dr. Stanzel, Herr Roland Haslauer (TFZ), Herr Markus Schardt und Frau Gerti Neugebauer (LWF) zur Aufnahme bzw. Durchführung der Zeitstudien, Frau Anja Rocktäschel, Herr Konrad Wanninger, Herr Roland Fleischmann und Herr Florian Raba (TFZ) bei der Datenaufnahme und Durchführung der Lager- und Volumenbestimmungsversuche, Frau Helga Nielsen und Frau Heike Eismann (Landesanstalt für Landwirtschaft (LFL)) bei der Erstellung der Grafiken und Frau Simone Höldrich (FH Weihenstephan) bei der Literaturrecherche.

Als Freunde standen mir für arbeitswissenschaftliche Belange Herr Dr. Reinhard Pausch, Herr Jürgen Bauer und Herr Ekkehard von Bodelschwingh (Lehrstuhl für Arbeitswissenschaft und angewandte Informatik) und für mathematische Fragen Herr Dr. Wolfgang Graf zu Castell-Rüdenhausen (Gesellschaft für Strahlenforschung (GSF)) beratend zur Seite.

Ohne Probanden, die sich für Untersuchungen zu Verfügung stellen, sind solche Arbeiten wie die vorliegende unmöglich zu erstellen. Deswegen gilt mein besonderer Dank den vielen Probanden bei der Scheitholzproduktion. Stellvertretend für alle möchte ich Herrn Romer, Herrn Müller und Herrn Herzner vom Biomassehof Allgäu für die hervorragende Zusammenarbeit und Unterstützung nennen.

Straubing, im Oktober 2006

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis		7
Abbildungsverzeichnis.....		11
Tabellenverzeichnis		17
Abkürzungen.....		20
1 Einleitung.....		23
2 Problemstellung.....		27
3 Zielsetzung		31
4 Methoden		35
4.1 Arbeitszeitbedarfsbestimmung.....		35
4.1.1 Die Methode nach REFA		35
4.1.2 Verwendete Hilfsmittel.....		36
4.1.3 Die Definitionen der einzelnen Arbeitsablaufabschnitte.....		38
4.1.3.1 Untersuchungen zur Brennholzernte (Selbstwerber).....		39
4.1.3.2 Untersuchung zur Scheitholzaufbereitung.....		41
4.2 Bestimmung der Arbeitsschwere		45
4.2.1 Befragung von Experten und Laien.....		45
4.2.2 Bestimmung der Arbeitsschwere nach OWAS.....		45
4.3 Bestimmung des Energieverbrauchs bei der Scheitholzproduktion.....		50
4.4 Bestimmung von Raummaßen für Scheitholz.....		52
4.4.1 Untersuchte Raummaße.....		52
4.4.2 Verwendete Messgeräte.....		54
4.4.3 Untersuchte Holzarten und Aufbereitungen.....		55
4.4.4 Versuchsplan und Messdurchführung		56
4.5 Bestimmung der Lagerungsverluste und der Wassergehaltsänderungen.....		61
4.5.1 Verwendete Holzarten und Sortimente.....		61
4.5.2 Lagergestaltung		61
4.5.3 Lagerstandorte und Versuchsdurchführung.....		63
4.5.4 Probenahme und Messmethodik.....		64
4.5.4.1 Erforderliche Trocknungsdauer (Vorversuch).....		65
4.5.4.2 Probenahme zur Wassergehaltsbestimmung (Vorversuch).....		65
4.5.4.3 Wassergehaltsbestimmung im einzelnen Scheit (Vorversuche).....		67
4.5.4.4 Die wiederkehrende Gewichtsbestimmung		70
4.5.4.5 Parallelmessung des Wassergehalts in einzelnen Scheiten		71
4.5.4.6 Schlussmessung nach zwei Jahren Lagerdauer		71
4.5.4.7 Visuelle Kontrolle.....		72
4.5.5 Datenauswertung		72

5	Ergebnisse	75
5.1	Arbeitszeitbedarf für die Brennholzbereitstellung.....	75
5.1.1	Zeitbedarf bei der Jungdurchforstung (Brennholzernte)	75
5.1.1.1	Die Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte	77
5.1.1.2	Die Zyklusdauer bei der Jungdurchforstung	80
5.1.1.3	Der spezifische Zeitbedarf bei der Holzernte	81
5.1.1.4	Die Arbeitsproduktivität.....	82
5.1.2	Zusammenfassung der Ergebnisse der Teilstudien der Holzernte.....	83
5.1.3	Zeitbedarf bei der Brennholzaufbereitung.....	87
5.1.3.1	Spalten mit der Axt oder dem Spalthammer	87
5.1.3.2	Spalten mit kleinem Senkrechtpalter	90
5.1.3.3	Spalten mit großem Senkrechtpalter	96
5.1.3.4	Spalten großem Waagrechtpalter	103
5.1.3.5	Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine.....	109
5.1.3.6	Sägen und Spalten mit der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine	116
5.1.3.7	Trennschnitte mit der Brennholz-Kreissäge	121
5.1.3.8	Schichten und Laden von Scheitholz	124
5.1.4	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Brennholzaufbereitung.....	126
5.2	Ergebnisse der Arbeitsschwereuntersuchung.....	129
5.2.1	Befragung zur Arbeitsschwere	129
5.2.2	Arbeitsschwereindex nach der OWAS-Methode	130
5.2.2.1	Holzernte	131
5.2.2.2	Spalten mit der Axt.....	132
5.2.2.3	Senkrechtpalter	132
5.2.2.4	Waagrechtpalter	133
5.2.2.5	Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine.....	133
5.2.2.6	Große kombinierte Säge-Spaltmaschine	134
5.2.2.7	Brennholzkreissäge.....	135
5.2.2.8	Zubringen von Holz.....	135
5.2.2.9	Schichten in Stapeln und Bündelhilfen	136
5.2.3	Reproduzierbarkeit und Repräsentativität der Bestimmungsmethode nach OWAS	137
5.2.4	Zusammenstellung und -Vergleich.....	139
5.2.5	Versuch einer Klassifizierung der Belastungsindizes	140
5.3	Ergebnisse zu den Energieverbrauchsmessungen	142
5.3.1	Kraftstoffverbrauch der Motorsäge bei der Holzernte	142
5.3.2	Stromverbrauch beim kleinen Senkrechtpalter	143
5.3.3	Dieserverbrauch beim großen Senkrecht- und Waagrechtpalter	143
5.3.4	Dieserverbrauch bei der kombinierten Säge-Spaltmaschine	145
5.3.5	Stromverbrauch beim Einsatz der Brennholzkreissäge	145
5.3.6	Tatsächliche Leistungsaufnahme elektrisch betriebener Geräte	146
5.4	Trocknungsverlauf bei der Lagerung.....	149
5.4.1	Jahreszeitliche Einflüsse.....	149
5.4.2	Vergleich der Versuchsjahre 2003/2004 (Wettereinfluss)	152
5.4.3	Einfluss des Lagerstandorts (Klima)	156
5.4.4	Einfluss der Aufbereitungs- und Lagerarten	158
5.5	Wassergehaltsverlauf in einem Holzsplit im Jahresverlauf.....	163
5.6	Der Trockenmasseverlust des Scheitholzes bei der Lagerung	166
5.7	Dichteunterschiede innerhalb der gelagerten Holzarten	168

5.8	Umrechnungsfaktoren für Brennholzsortimente	172
5.8.1	Ergebnisse der Stapelversuche	172
5.8.2	Vergleich mit Literaturangaben.....	177
5.8.3	Fehlerbetrachtungen	181
5.9	Prozesskettenanalyse	183
5.9.1	Ergebnisse der Befragung von Selbstwerbern.....	183
5.9.2	Identifikation von Grundverfahren (Modellverfahrensketten)	186
5.9.3	Arbeitszeitbedarf in den Prozessketten.....	189
5.9.4	Arbeitsschwere in den Prozessketten	192
5.9.5	Spezifischer Energieaufwand in den Prozessketten	194
5.9.6	Bereitstellungskosten in den Prozessketten	197
5.9.6.1	Maschinenkostenberechnung.....	197
5.9.6.2	Spezifische Energiekosten der Prozessketten.....	200
5.9.6.3	Gesamtkosten in den Prozessketten.....	201
5.9.7	Prozesskettenvergleich	206
6	Schlussfolgerungen	209
7	Zusammenfassung.....	213
8	Abstract.....	217
9	Literaturverzeichnis	219
10	Anhang	223
10.1	Arbeitsablaufabschnitte und Beschreibungen der einzelnen Zeitstudien	223
10.2	Fragebogen für die Selbstwerber im Staatswald bei Freising.....	240
10.3	Gewichte verschiedener Raummeterbündel	242
10.4	Tabellen der Volumenbestimmungsergebnisse.....	243

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Biomassemix in Bayern 2002 ([9]).....	24
Abb. 2: Preisverlauf von Biomasse-Festbrennstoffen und Heizöl, umgerechnet in Cent pro Liter Heizöläquivalent. Datenquellen für Heizöl: Tecson [58] (Monatsmittelwerte), Holzpellets/Hackschnitzel: CARMEN e.V. [13], Scheitholz: eigene Erhebungen TFZ [30]. Preise inklusive der jeweiligen Mehrwertsteuer, sofern erhoben	25
Abb. 3: Bezugsquellen für Holz in 2003. Angaben der Haushalte mit Holzeinsatz in Prozent [2]. Grafik: Rheinbraun Brennstoff GmbH. Datenquelle: GFK Panel Services, Nürnberg	26
Abb. 4: Schema der unterschiedlichen Logistikpfade bei der Bereitstellung von Scheitholz.....	28
Abb. 5: Input-Output-Modell für die Scheitholzbereitstellung	31
Abb. 6: Konzept der Datenaufnahme und -auswertung in den durchgeführten Arbeitstudien (BDH Brusthöhendurchmesser, MDM Mittendurchmesser, MDE Mobile Datenerfassung).....	36
Abb. 7: Durchführen der Arbeitszeitbestimmung mit PDA und PC MDE Mobile Datenerfassung	37
Abb. 8: Benutzung eines PDA zur Zeiterfassung in den Versuchen.....	38
Abb. 9: Elektronische Kluppe für die Durchmesserbestimmung	40
Abb. 10: Grundstellungen mit den dazugehörigen Ziffern für den Bewertungscode der Arbeitsschwereuntersuchung nach OWAS.....	46
Abb. 11: Beispiele für die Ziffernvergabe nach Körperhaltungen bei OWAS.....	47
Abb. 12: Die WinOWAS-Eingabemaske zur Feststellung des OWAS Codes und zur automatischen Zuordnung zu einer Maßnahmeklasse.....	48
Abb. 13: Der Raummeter Brennholz (Rm) [17].....	52
Abb. 14: Der Raummeter aus Meterscheitholz, kreuzweise geschichtet.....	53
Abb. 15: In Stapel- und Schüttversuchen betrachtete Raummaße für Brennholz	54
Abb. 16: Der Messrahmen für die Bestimmung der Scheitholz Raummaße.....	55
Abb. 17: Höhenmessung für die Volumenbestimmung im Standard-Messrahmen	58
Abb. 18: Befüllen der Gitterbox für die Schüttvolumenbestimmung.....	59
Abb. 19: Bündelhilfe entweder für 0,5 Rm oder 1 Rm Scheitholz.....	62
Abb. 20: Ein Beispiel einer Lageranordnung der Meterscheitholzbündel am Standort Freising: hier nicht abgedeckte Lagerung außen	63
Abb. 21: Verlauf des Wassergehalts einer Buchenholzprobe im Trockenschrank bei 105 °C	65
Abb. 22: Schnittfolge für die Probenahme	66
Abb. 23: Probenahme mit Kreissäge für Wassergehaltsbestimmung.....	67

Abb. 24: Probenahmepositionen für die Wassergehaltsbestimmung am Meterscheit.....	68
Abb. 25: Optimale Position für eine einzelne Probenahme zur Wassergehaltsbestimmung in einem Buchen-Meterscheit	69
Abb. 26: Verteilung der Häufigkeit, mit der die optimale Probennahmeposition bei der Wassergehaltsbestimmung in einem bestimmten Abschnitt eines Meterscheits lag (Bereiche in denen die gemessene Wassergehaltsprobe mit dem Gesamtdurchschnitt übereinstimmte).....	70
Abb. 27: Die regelmäßige Wiegung der Meterscheit-Bündel (schematisch).....	70
Abb. 28: Positionen der für Probennahme gewählten Scheite eines Bündels am Lagerende	72
Abb. 29: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zur Holzernte.....	77
Abb. 30: Die Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte der Teilstudien 1 bis 4 (Fichte) bei der Jungdurchforstung (PVZ: persönliche Verteilzeit; SVZ: sachliche Verteilzeit).....	78
Abb. 31: Die Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte der Teilstudien 5 bis 8 (weitere Baumarten) bei der Jungdurchforstung (PVZ: persönliche Verteilzeit; SVZ: sachliche Verteilzeit).....	80
Abb. 32: Arbeitszyklusdauer in Abhängigkeit vom Rohschaftvolumen m.R. (mit Rinde).....	81
Abb. 33: Spezifischer Zeitbedarf bei unterschiedlichen Schaftvolumina (GAZ, Fm m.R. mit Rinde)	82
Abb. 34: Zusammenstellung der Ergebnisse der gemessenen technischen Arbeitsproduktivität aller durchgeführten Arbeitsstudien Ah Ahorn, Bu Buche.....	84
Abb. 35: Tatsächlicher Zeitbedarf nach Teilstudie 1 und EST-Zeitbedarf.....	85
Abb. 36: Tatsächlicher Zeitbedarf und EST-Zeitbedarf, Teilstudien 2 und 3.....	86
Abb. 37: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit Spalthammer	87
Abb. 38: Die zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte der Teilstudien zum Axtspalten (AX 1) und zum Spalten mit Spalthammer (SP 1 und 2).....	88
Abb. 39: Durchschnittliche Dauer der drei einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim manuellen Spalten mit der Axt (AX 1) bei der Holzart Fichte.....	89
Abb. 40: Durchschnittliche Dauer in Sekunden der drei einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim manuellen Spalten mit dem Spalthammer (Teilstudien SP 1 und 2).....	90
Abb. 41: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit kleinem Senkrechtpaltr.....	91
Abb. 42: Die Verteilung der Mittendurchmesser des Holzes in den Kleine-Senkrechtpaltr(KS)-Studien. Grafiktitel mit Baumart, Anzahl Rundlingen und mittlerem Mittendurchmesser.....	92
Abb. 43: Die zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den Kleine-Senkrechtpaltr(KS)-Studien	93
Abb. 44: Zyklusdauer und technische Arbeitsproduktivität (TAP) in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser (MDM) der Rundlinge (Werte aus allen Kleine-Senkrechtpaltr(KS)-Studien).....	95

Abb. 45: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit großem Senkrechtpalter (hier: Spaltbrummi, Fa. Vogesenblitz)	97
Abb. 46: Die Verteilung der Mittendurchmesser des Holzes in den Große-Senkrechtpalter(GS)-Studien. Grafiktitel mit Baumart, Anzahl Rundlingen und mittlerem Mittendurchmesser. Teilstudie GS 6 nicht dargestellt (keine Einzelvolumenbestimmung)	98
Abb. 47: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den Große-Senkrechtpalter(GS)-Studien. Teilstudie GS 6 nicht dargestellt (keine einzelnen Ablaufabschnitte gemessen). AK Arbeitskräfte	100
Abb. 48: Zyklusdauer in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge bei den Große-Senkrechtpalter(GS)-Studien. Teilstudie GS 6 nicht dargestellt (keine einzelnen Ablaufabschnitte gemessen).....	101
Abb. 49: Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je Maschinenstunde beim Einsatz des großen Senkrechtpalters in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge. AK Arbeitskräfte	102
Abb. 50: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit großem Waagrechtpalter (hier: Hydromax 24 t, Fa. Posch).....	104
Abb. 51: Die Verteilung der Mittendurchmesser des Holzes in den Waagrechtpalter(WS)-Studien. Grafiktitel mit Baumart, Anzahl Rundlingen und mittlerem Mittendurchmesser	105
Abb. 52: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den Waagrechtpalter(WS)-Studien. AK Arbeitskräfte	106
Abb. 53: Zyklusdauer in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge bei den Waagrechtpalter(WS)-Studien	107
Abb. 54: Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je Maschinenstunde beim Einsatz des Waagrechtpalters (WS) in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge. AK Arbeitskräfte	108
Abb. 55: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK). Hier: Spaltfix 300, Fa. Posch).....	109
Abb. 56: Verteilung der Mittendurchmesser des Holzes in den Teilstudien zur kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK). Grafiktitel mit Baumart, Anzahl Rundhölzer, mittlerem Mittendurchmesser und mittlerer Länge.....	111
Abb. 57: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in Teilstudien mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK). Für KK 2 und 5 wurden Rohdaten einer früheren Untersuchung der LWF ausgewertet (Daten aus MALL [46]).....	113
Abb. 58: Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je Maschinenstunde beim Einsatz der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK) in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge. AK Arbeitskräfte	115
Abb. 59: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK). Hier: Herkules II, Fa. Kretzer	117
Abb. 60: Verteilung der Mittendurchmesser in den Teilstudien zur großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK). Grafiktitel mit Baumart, Anzahl der Rundhölzer, mittlerem Mittendurchmesser und mittlerer Länge	118

Abb. 61: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den Teilstudien mit großen kombinierten Säge-Spaltmaschinen (GK). Zur Teilstudie GK 3 wurden Rohdaten einer früheren Untersuchung der LWF ausgewertet (Daten zu MALL [46])	119
Abb. 62: Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je Maschinenstunde beim Einsatz der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK) in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge. AK Arbeitskräfte.....	120
Abb. 63: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Trennschnitt mit der Kreissäge (KR). Hier: WK 771, Fa. BGU	122
Abb. 64: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den 5 Teilstudien zum "Trennschnitt mit der Brennholz-Kreissäge" (KR). Grafiktitel mit Baumart, Anzahl der Meterhölzer, ggf. mittlerem Mittendurchmesser (bei Rundlingen) und Aufbereitungsform.....	123
Abb. 65: Arbeitsplatzbeispiel für das Stapeln und Bündeln mit einer Bündelhilfe, hier für 0,5 Rm-Bündel.....	125
Abb. 66: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte beim Schichten mit Bündelhilfe (Teilstudien SC 1 und 2). AK Arbeitskraft.....	126
Abb. 67: Ergebnisse der Befragung zur Einschätzung der Arbeitsschwere; Einteilung von sehr leicht (0) bis sehr schwer (5). Beim Senkrechtspaltern erfolgte keine Differenzierung in große oder kleine Geräte	130
Abb. 68: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte bei der Holzernte (Durchforsten).....	131
Abb. 69: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim Spalten mit der Axt.....	132
Abb. 70: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte im Verfahren "Senkrechtspalter"	133
Abb. 71: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim kleinen Spaltautomaten.....	134
Abb. 72: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim Arbeiten mit der Brennholzkreissäge	135
Abb. 73: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim Zubringen des Holzes	136
Abb. 74: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim Bündeln mit einer Bündelhilfe	137
Abb. 75: Belastungsindex L für die verschiedenen möglichen Arbeiten (Teilverfahren) einer Scheitholzbereitstellungskette (Ursprung der Y-Achse bei 100, da hier der niedrigste OWAS-Wert liegt).....	139
Abb. 76: Vergleich der Belastungsindizes nach OWAS mit den Ergebnissen der Befragung, bezogen auf eine einheitliche Bezugsbasis (hier: kleiner Spaltautomat = 100%)	140
Abb. 77: Wassergehaltsverlauf bei der Lagerung der verschiedenen Holzarten. Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising.....	149

Abb. 78: Trocknungsrate in Litern bzw. kg Wasser pro Monat bei frisch eingelagerter Buche und Fichte im 1. Versuchsjahr (2003). Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising	151
Abb. 79: Trocknungsrate in Litern bzw. kg pro Monat bei frisch eingelagerter Buche und Fichte im 2. Versuchsjahr (2004). Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising).....	151
Abb. 80: Vergleich der mittleren monatlichen Sättigungsdefizite der Luft (E-e) in Freising in den beiden Lagerungsperioden 2003 und 2004	153
Abb. 81: Vergleich der mittleren monatlichen Niederschläge in Freising in den beiden Lagerungsperioden 2003 und 2004.....	154
Abb. 82: Gegenüberstellung der Wassergehaltsverläufe bei der Lagerung von Buche und Fichte in beiden Lagerperioden (Versuch 1 ab Dez. 2002, Versuch 2 ab Dez. 03), Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising).....	155
Abb. 83: Direkter Vergleich der Jahreseinflüsse auf die Wassergehaltsverläufe beider Lagerungsversuche (Versuch 1 ab Dez. 2002, Versuch 2 ab Dez. 03), Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising.....	155
Abb. 84: Vergleich und Verlauf des Sättigungsdefizits (Trocknungsvermögen) der Luft an den Standorten Kempten und Freising in den beiden Versuchsjahren	157
Abb. 85: Vergleich des Trocknungsverlaufes von Buchenscheitholz an den Standorten Freising und Kempten. Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten	158
Abb. 86: Wassergehaltsverlauf von gespaltenen 33 cm Scheiten (Buche/Fichte) bei abgedeckter und ungedeckter Lagerung in Gitterboxen (geschüttet) in Freising im Jahr 2004	159
Abb. 87: Schematische Darstellung der kapillaren Feuchtigkeitsbewegung in einem mikroskopischen Schnitt eines Koniferenholzes bei der Trocknung [42]; a: Anfangszustand eines frisch gefällten Holzes; b, c: Fortschritt der Trocknung im weiteren zeitlichen Verlauf.....	160
Abb. 88: Vergleich der gespaltenen Meterscheite mit ungespaltenen bei Buchen und Fichte in Freising (innen gelagert).....	161
Abb. 89: Vergleich der Lagerarten bei der Fichte am Standort Freising.....	162
Abb. 90: Vergleich der Lagerarten bei der Fichte am Standort Kempten	163
Abb. 91: Wassergehaltsverteilungen im Meterscheitholz im Jahresverlauf bei ungedeckter Lagerung im Freien	164
Abb. 92: Wassergehaltsverteilung in einem waldfrischen Kiefernrundling mit Asteinschlüssen bei 20, 60 und 90 cm.....	165
Abb. 93: Veränderung der Holzfeuchteverteilung in einer 50 mm dicken frei stehenden Buchenbohle [29]. Erläuterung: 1 nach 6 Wochen, 2 nach 6 Monaten, 3 keine Angabe, 4 nach 12 Monaten, 5 nach 18 Monaten	166
Abb. 94: Trockenmasseverlust unterschiedlicher Meterholzsportimente bei Lagerung innen und außen. Lagerstandort: Freising, Lagerdauer: 24 Monate, Werte für "außen" sind Mittelwerte für abgedeckte und ungedeckte Lagerung	167

Abb. 95: Gewichtsstreuung pro 1 Rm Bündel mit gespaltenem Fichtenholz (berechnet auf einen einheitlichen Bezugswassergehalt von $w=15\%$).....	169
Abb. 96: Häufigkeitsverteilung der Rohdichte (veraltet "Rohwichte") bei ausgewählten Baumarten [34].....	170
Abb. 97: Gewichte von Rundlingen und gespaltenem Holz in einem Raummeterbündel bei Fichte und Buche (berechnet auf einen einheitlichen Bezugswassergehalt von $w=15\%$).....	171
Abb. 98: Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Sortimenten und Lagerformen, hier: bezogen auf einen Raummeter 33-cm-Scheite, geschichtet.....	173
Abb. 99: Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Sortimenten und Lagerformen, hier: bezogen auf einen Raummeter (Rm) gespaltene Meterholzscheite, geschichtet.....	173
Abb. 100: Unterschiedliche Füllhöhe von 33-er Scheiten verschiedener Holzarten aber gleicher Ausgangsmengen (Rohholzvolumen). links: Buche; rechts: Fichte.....	175
Abb. 101: Von Befragten verwendete Maschinen und Geräte beim Spalten.....	186
Abb. 102: Von Befragten geschätzter mittlerer Zeitbedarf je Rm Holzwerbung im Wald (Meterholz).....	186
Abb. 103: Schema der unterschiedlichen Scheitholzbereitstellungsketten.....	187
Abb. 104: Arbeitszeitanteile verschiedener Phasen der Scheitholzbereitstellung, dargestellt für die vier ausgewählten Modellverfahrensketten. Holzernte: Holzernte mit Rücken. Transporte: Hin- und Rück Wald-Bearbeitungsplatz-Kunde. Laden: Be- und Entladen und Aufschichten. Aufbereiten: Ablängen, Spalten, Beschicken.....	192
Abb. 105: Energieverbrauchsanteile verschiedener Phasen der Scheitholzbereitstellung, dargestellt für die vier ausgewählten Modellverfahrensketten. Holzernte: Holzernte und Rücken. Transporte: Hin- und Zurück Wald-Bearbeitungsplatz-Kunde. Laden: Be- und Entladen und Aufschichten des Holzes. Aufbereiten: Ablängen, Spalten, Beschicken.....	196
Abb. 106: Kostenanteile verschiedener Phasen der Scheitholzbereitstellung, dargestellt für die vier ausgewählten Modellverfahrensketten. Holzernte: Holzernte und Rücken. Transporte: Hin- und Zurück Wald-Bearbeitungsplatz-Kunde. Laden: Be- und Entladen und Aufschichten des Holzes. Aufbereiten: Ablängen, Spalten, Beschicken.....	205
Abb. 107: Zuordnung der Bereitstellungskosten in den Modellverfahrensketten nach Kostengruppen * bei Pfad 4 ohne Holzerntekosten (Variante Holzzukauf).....	206
Abb. 108: Zusammenstellung der Bewertungskenngrößen für die einzelnen Modelverfahrensketten, hier bezogen auf je einen Raummeter 33-er Scheite, gestapelt (außer OWAS: dimensionslos, Beginn bei 100, da niedrigster Wert des OWAS-Indexes). Zur Umrechnung auf andere Volumenmaße und Sortimente siehe Kapitel 5.8.1.....	208

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Voraussetzung und Qualifikation der eingesetzten Probanden	49
Tab. 2:	Anzahl der Aufnahmestunden und daraus resultierende Bilder der Untersuchung	50
Tab. 3:	Wassergehalte des für die Bestimmung der Raummaße verwendeten Holzes (Lagerung unter schattigen, windarmen Bedingungen am Gewässer)	56
Tab. 4:	Versuchsplan für die Raummaßbestimmung der Buchen(Bu)- und Fichten(Fi)- proben (je Holzprobe drei Wiederholungen, außer kreuzweise Stapelung: 1 Messwert) sowie Schritte der Messdurchführung	57
Tab. 5:	Übersicht über die im Lagerversuch eingesetzten Holzarten und Sortimente	64
Tab. 6:	Zeitstudienbeschreibung: Holzernte Teilstudie 1 mit Fichte	76
Tab. 7:	Die technische Arbeitsproduktivität (TAP) der einzelnen Teilstudien der Durchforstung in Fm m.R. pro Stunde	83
Tab. 8:	Übersicht der Zeitgrade bei den Teilstudien zur Holzernte	85
Tab. 9:	Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) und mittlere Zyklusdauer in den Kleinen-Senkrechtspalter(KS)-Studien. Eine Arbeitskraftstunde AKh entspricht hier einer Maschinenarbeitsstunde MAS	96
Tab. 10:	Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) je Arbeitskraftstunde und mittlere Zyklusdauer in den Großen-Senkrechtspalter(GS)-Studien. Berechnung der TAP je Maschinenarbeitsstunde MAS bzw. Arbeitskraftstunde AKh aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit (GAZ). n.b.: nicht bestimmt	103
Tab. 11:	Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschinen- und Arbeitskräfteeinsatzes und mittlere Zyklusdauer in den Waagrechtspalter(WS)- Studien. Berechnung aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten	109
Tab. 12:	Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschinen- und Arbeitskräfteeinsatzes und mittlere Zyklusdauer beim Einsatz der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK-Studie). Berechnung der TAP je Maschinenarbeitsstunde MAS bzw. Arbeitskraftstunde AKh aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten	116
Tab. 13:	Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschineneinsatzes und mittlere Zyklusdauer beim Einsatz der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK-Studie). Berechnung der TAP je Maschinenarbeitsstunde (MAS) aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten. Eine MAS entspricht hier einer AKh.	121
Tab. 14:	Mittlere technische Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschineneinsatzes beim Ablängen mit der Brennholz-Kreissäge. Berechnung der TAP je Maschinenarbeitsstunde (MAS) aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten . Eine MAS entspricht hier einer AKh.	124
Tab. 15:	Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) beim Scheitholz-Schichten und -laden in verschiedenen Lagerformen (SC-Studien)	125

Tab. 16: Vergleich der Technischen Gesamtarbeitsproduktivität aller untersuchten Teilverfahren; Die Werte in Raummeter und Schüttraummeter errechnen sich aus den Ergebnissen für Festmeter unter Verwendung der Umrechnungsfaktoren in Kapitel 5.8.1, MDM: Mittendurchmesser.....	128
Tab. 17: Vergleich der beiden Belastungsindizes (L) für dasselbe Verfahrensbeispiel, jedoch einmal mit und einmal ohne Zeitversatz der ausgewerteten Bilderfolgen.....	138
Tab. 18: Vergleich der beiden Belastungsindizes (L) für dasselbe Verfahrensbeispiel, jedoch einmal mit 15- und einmal mit 30-Sekundenintervallen für die ausgewerteten Bilderfolgen (d.h. doppelte bzw. halbe Bilderanzahl).....	138
Tab. 19: Klassifizierungsvorschlag für eine Beurteilung und Interpretation der gemessenen Belastungsindizes bei der Brennholzbereitstellung.....	141
Tab. 20: Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchsmessung für die Motorsäge bei der Holzernte (Jungdurchforstung).....	143
Tab. 21: Gemessener Stromverbrauch beim Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter.....	143
Tab. 22: Ergebnisse der Dieseldieselkraftstoff(DK)-Verbrauchsmessung mit den großen Spaltern. GS großer Senkrechtspalter, WS Waagrechtspalter.....	144
Tab. 23: Energieverbrauch bei den großen Senkrecht- und Waagrechtspaltern umgerechnet auf kWh (1 Liter Diesel \equiv 10 kWh).....	145
Tab. 24: Gemessener Dieseldieselkraftstoff(DK)-Verbrauch bei kombinierten Säge-Spaltmaschinen.....	145
Tab. 25: Ergebnisse der Stromverbrauchsmessung beim Ablängen von Meterscheiten auf 33 cm Scheite mit der Brennholzkreissäge.....	146
Tab. 26: Art der Wasserbindung im Holz (Quelle:[10]).....	152
Tab. 27: Klimadaten für die verschiedenen Lagerperioden der beiden Lagerversuche in Freising (Mittelwerte aus benachbarter Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes).....	153
Tab. 28: Klimadaten der beiden Lagerungsstandorte Freising und Kempten (Mittelwerte aus den monatlichen Daten des Deutschen Wetterdienstes).....	156
Tab. 29: Natürliche Dauerhaftigkeit nach DIN EN 350-2 [59]und[16].....	168
Tab. 30: Umrechnungsfaktoren für Raum- und Festmetermaße, bezogen auf unterschiedliche Grundsortimente (mit Rinde).....	176
Tab. 31: Relative Variationskoeffizienten (VK in %) der Wiederholungsmessungen im Messrahmen bzw. in der Gitterbox.....	177
Tab. 32: Relative Variationskoeffizienten (VK in %) der Abweichungen zwischen den berechneten Verhältniszahlen (Umrechnungsfaktoren) für die einzelnen Sortimente (Anzahl Chargen je nach Materialmenge zwischen 4 und 6 Chargen, vgl. Kapitel 4.4.4).....	177
Tab. 33: Vergleich der im Versuch ermittelten Umrechnungsfaktoren mit entsprechenden Angaben aus der Literatur (Quellen: BML [11] und LWK [49], Literaturangaben zur kreuzweisen Schichtung liegen nicht vor, daher hier keine Darstellung).....	178

Tab. 34: Energieinhalte der hier untersuchten Sortimente für Fichten- und Buchenholz bei verschiedenen Wassergehalten (zu den hier verwendeten Umrechnungsfaktoren von Festmeter in die Raummetermaße vgl. Tab. 30).....	181
Tab. 35: Ergebnisse der Befragung von Selbstwerbern. Die Reihenfolge entspricht den Nummern der Fragen im Fragebogen (vgl. Anhang 10.2). Durch Rundungsunschärfen oder bei Mehrfachnennungen ergibt die Summe nicht immer genau 100%	184
Tab. 36: Durchschnittlicher spezifischer Zeitbedarf je Festmeter Scheitholz (hier: als 33 cm Scheite) in den einzelnen Prozessketten (Zeitangaben als reine Arbeitszeit, RAZ, vgl. Kapitel 4.1)	191
Tab. 37: Arbeitsbelastung in den einzelnen Prozessketten (OWAS-Faktor nach Lundqvist)	194
Tab. 38: Der spezifische Energieaufwand in den einzelnen Prozessketten. Endenergieträger in Klammern: k Kraftstoff, el elektrischer Strom	195
Tab. 39: Energiebilanz der Scheitholzbereitstellung. Hier nur Berechnungen für den Energieverbrauch in der Prozesskette (ohne Maschinenherstellung und Betriebsstoffe).....	197
Tab. 40: Berechnung der Maschinenkosten ohne Energiekosten und Lohnanspruch (durch Auf- oder Abrundung der Einzelwerte sind minimale Abweichungen bei der Summenbildung möglich)	200
Tab. 41: Spezifische Energiekosten (€/Fm) der Prozessketten.....	201
Tab. 42: Spezifische Gesamtkosten der Scheitholzbereitstellung in den einzelnen Prozessketten (€/Fm). Angaben inkl. Energie- und Lohnkosten	203
Tab. 43: Gesamtvergleich aller Bewertungsmerkmale für die vier definierten Modell-Prozessketten der Scheitholzbereitstellung.....	207
Tab. 44: Theoretische Werte für die Gewichte der Raummeterbündel ^a	242
Tab. 45: Gemessene Gewichte der Raummeterbündel ^b aus dem Lagerversuch	242
Tab. 46: Variationskoeffizient (%) der Volumenmessungen.....	243
Tab. 47: Ergebnis Volumenbestimmung Fichte (alle Volumina beziehen sich auf 1 Fm)	243
Tab. 48: Ergebnis Volumenbestimmung Buche (alle Volumina beziehen sich auf 1 Fm).....	244

Abkürzungen

≡	entspricht
a	Annum (Jahr)
AD	Altdurchforstung
AKh	Arbeitskraftstunde
AZ	Allgemeine Zeiten
BGU	Firma für Holzbearbeitungsgeräte
BHD	Brusthöhendurchmesser
BImSchV	Bundesimmissionsschutzverordnung
Bu	Buche
C.A.R.M.E.N.	Centrales Agrar- Rohstoff-Marketing- und Entwicklungsnetzwerk
ct	Cent
DIN	Deutsche Industrienorm
DK	Dieselmotortreibstoff
DMS	Dehnmessstreifen
E-e	Sättigungsdefizit der Luft
EN	Europäische Norm
FH	Fachhochschule
Fi	Fichte
fm	Fermi (10^{-15})
Fm	Festmeter
g	Gramm
GAZ	Gesamtarbeitszeit
GK	Große kombinierte Säge-Spaltmaschinen
g_m	Mittengrundfläche (Querschnittsfläche)
g_o	Grundfläche oben
GS	Großer Senkrechtpalmer
g_u	Grundfläche unten
h	Stunde
HPa	Hektopascal
I_N	Industrieholz Normal (Sortierungsmerkmal für Rohholz)
JD	Jungdurchforstung
Kie	Kiefer
KK	Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschinen
KR	Brennholzkreissäge
KS	Kleiner Senkrechtpalmer
kW	Kilowatt
kWh	Kilowattstunde

l	Liter
L	OWAS-Faktor nach Lundqvist
LKW	Lastkraftwagen
LWF	Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft
m.R.	mit Rinde
MAS	Maschinenarbeitsstunde
MDE	Mobile Datenerfassung
MDM	Mittendurchmesser
MK	Maßnahmeklasse
NN	Normal Null (Meereshöhe)
OS	Operating System (Betriebssystem)
OWAS	Owako Working posture Analysing System
PC	Personal Computer
PDA	Personal Digital Assistant
PKW	Personenkraftwagen
PVZ	Persönliche Verteilzeit
RAZ	Reine Arbeitszeit
REFA	Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.
Rm	Raummeter (auch Ster)
S&Ü	Firma für Holzbearbeitungsgeräte
SI	Système International d'Unités
SRm	Schüttraummeter
STATUMT	Zeitstudienauswertungssoftware am PC von Laubress™
SVZ	Sachliche Verteilzeit
TAP	Technische Arbeitsproduktivität
TFZ	Technologie- und Förderzentrum
TUM	Technische Universität München
UMT	Zeitstudiensoftware für den Palm
UV	Ultraviolett
V	Volumen
VK	Variationskoeffizient
w	Wassergehalt
w _{ges}	Gesamtwassergehalt
WS	Waagrechtspalter

1 Einleitung

Seitdem die Menschheit den Umgang mit Feuer erlernte, diente Holz neben der Nutzung als Baumaterial überwiegend als natürlicher Rohstoff zur Energieerzeugung vor allem für Licht und Wärme. In vielen ärmeren Ländern ist dies sogar heute noch der Fall. Seit der Versorgung mit günstigem fossilem Öl in den 60-iger Jahren des 20. Jahrhunderts wurde das Holz in der Bundesrepublik Deutschland und den anderen eher wohlhabenden Ländern jedoch als Energielieferant zunehmend verdrängt. Erst in den letzten Jahren begann wegen steigender Energiepreise, dem zunehmenden Bewusstsein der Endlichkeit fossiler Rohstoffquellen und der fortlaufenden Klimaschutzanstrengungen wieder eine Rückbesinnung auf Holz als Energieträger. Es gehört zur sogenannten Biomasse, also den nachwachsenden Rohstoffen organischer Herkunft, die neben der solaren Strahlung, der Windenergie, der Wasserkraft und der Erdwärme zu den Erneuerbaren Energien zählt. Die Verfeuerung von Holz zur Wärmeerzeugung ist ein Mosaikstein bei der Nutzung der Erneuerbaren Energien und leistet damit auch in Deutschland einen Beitrag für die Lösung der Energieprobleme des 21. Jahrhunderts. Dies hat nicht nur Vorteile, wie an den Diskussionen um Feinstaub erkennbar ist. Daher sollte Brennholz möglichst günstig an den Markt gebracht werden und möglichst schadstoffarm verbrannt werden können. Am effektivsten erfolgt eine Verfeuerung von Holz in modernen großen Feuerungsanlagen.

Doch trotz aller Bemühungen, die energetische Biomassennutzung in zentralen Konversionsanlagen für die (Nah-)Wärme- oder gar Stromerzeugung zu forcieren, bleibt der größte Teil der Holznutzung auch weiterhin dem privaten oder kleingewerblichen Bereich vorbehalten. Hier sind es vor allem die privaten Haushalte, die sich – falls eine Holzfeuerung verwendet werden soll – in der überwiegenden Zahl aller Fälle für eine Scheitholzheizung entscheiden. Oft handelt es sich dabei nicht einmal um Zentralheizungssysteme, sondern um Einzelfeuerstätten als Zusatzheizung, die auch bei Neubauten vielerorts standardmäßig vorgesehen sind oder einfach nur im vorhandenen Gebäudebestand "wiederentdeckt" werden. In diesem Anwenderbereich dominiert vor allem das Scheitholz, welches mit relativ geringem technischen Aufwand beschafft und aufbereitet, kostengünstig und verlustarm bevorratet und in relativ einfachen Anlagen zur Raum- oder Zentralheizung verwendet werden kann. Scheitholz ist somit der Hauptbrennstoff innerhalb der Brennstoffkategorie "Brennholz", welche mit ca. 45% den größten Einzelbeitrag zum Bioenergieaufkommen Bayerns leistet (Abb. 1).

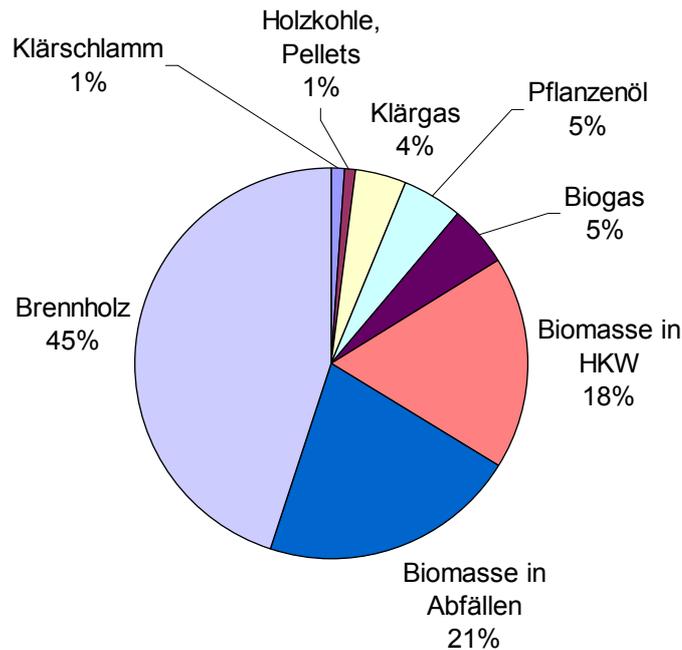


Abb. 1: Biomasse in Bayern 2002 ([9])

Die Ursachen für die anhaltend hohe Bedeutung dieses traditionellen Energieträgers sind vielfältig. Bei den Einzelfeuerstätten (z. B. Kachel- und Kaminöfen) erhält neben traditionellen Gewohnheiten auch der Aspekt der Wohnwertsteigerung zunehmende Bedeutung, zumal derartige Feuerungen in letzter Zeit über die meist vorhandene Sichtscheibe auch eine Beobachtung des Brennraumes und des Flammenspiels erlauben.

Zum anderen möchten die Anwender unabhängiger von den bisherigen Energiequellen werden. Vielfach spielt dabei auch der Wunsch nach einer Notversorgung bei Stromausfall eine Rolle. Diese Motivation wurde zuletzt auch durch die Meldungen über winterbedingte mehrtägige Stromausfälle im Münsterland in 2005 und durch entsprechende Ereignisse in Nordamerika weiter verstärkt. Auch Freizeitaspekte werden häufig genannt, die Arbeiten im Wald bei der Selbstwerbung und das Aufbereiten zu Scheitholz werden vielfach auch als Bewegungsausgleich für sitzende Tätigkeiten aufgefasst, so dass die dabei aufgewendete Arbeitszeit nicht notwendigerweise als Kostenfaktor anzusehen ist. Je größer allerdings die verbrauchte Brennholzmenge ist, desto mehr wird aber auch bei der Brennholzbeschaffung auf Arbeitseffizienz und Wirtschaftlichkeit geachtet.

Bei Scheitholz-Zentralheizungen, deren Betrieb einen deutlich größeren jährlichen Brennstoffbedarf verursacht als der Betrieb von Einzelraumfeuerungen, spielen die Fragen der Wohnwertsteigerung und der Absicherung bei Stromausfall meist keine entscheidende Rolle mehr. Hier geht es verstärkt um wirtschaftliche Vorteile, die mit dem Holzeinsatz verbunden sind, zumal heutige Scheitholzvergaserkessel einen Entwicklungsstand erreicht haben, der einen effizienten, störungsfreien und relativ schadstoffarmen Betrieb ermöglicht [22]. Als wesentliche Entwicklungen sind hier insbesondere die Kombination mit gut dimensionierten Pufferspeichern und die Regelungstechnik zu nennen.

Zu Ausgabenminderungen und Kostenvorteilen kann es vor allem dann kommen, wenn zunehmend teurere konventionelle Wärmeenergieträger, wie Heizöl oder Erdgas, durch günstigeres Holz ganz oder teilweise ersetzt werden. Selbst bei einem Ankauf von Scheitholz zu üblichen Marktpreisen kann ein solcher wirtschaftlicher Anreiz gegeben sein. Das zeigt ein einfacher Vergleich der Energieträgerkosten in Abb. 2, darin beträgt der Preisabstand von offenfertig angeliefertem Scheitholz zum Heizöl für den Endverbraucher zu Jahresmitte 2006 4,2 ct/kWh lag.

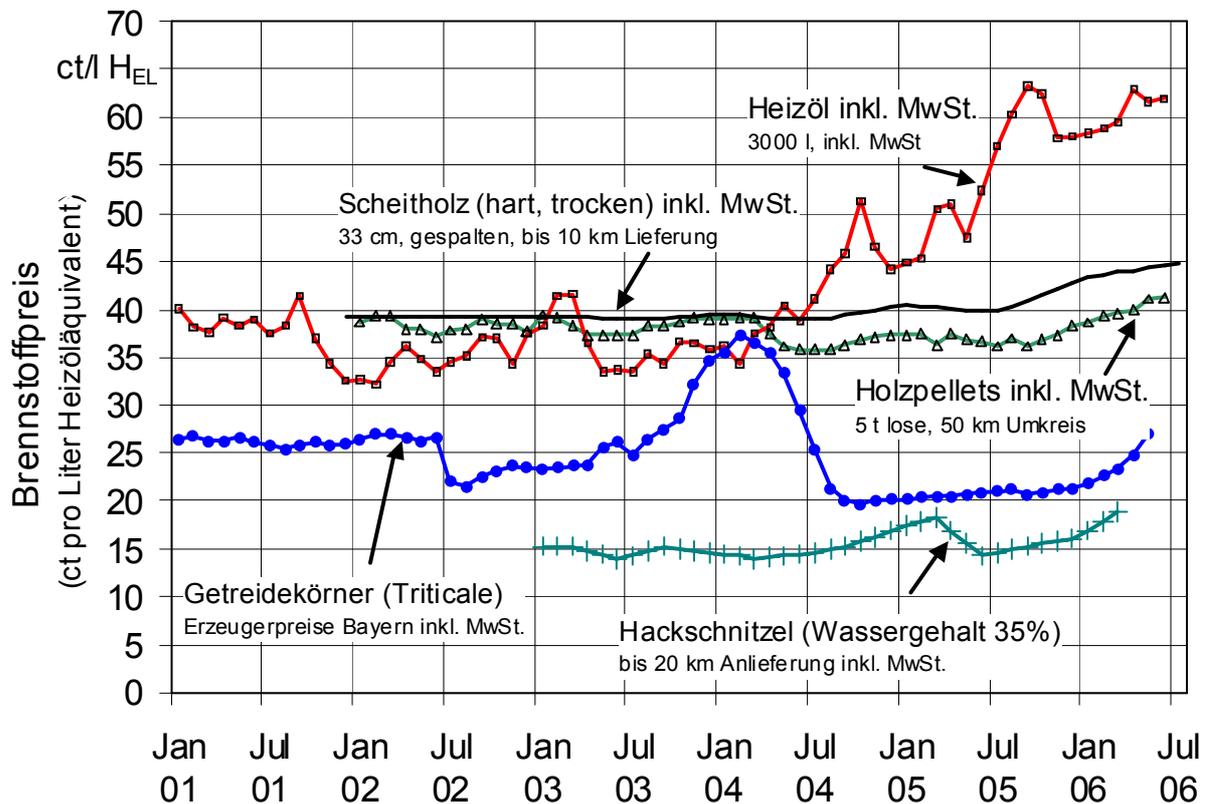


Abb. 2: Preisverlauf von Biomasse-Festbrennstoffen und Heizöl, umgerechnet in Cent pro Liter Heizöläquivalent. Datenquellen für Heizöl: Tecson [57] (Monatsmittelwerte), Holzpellets/Hackschnitzel: CARMEN e.V. [13], Scheitholz: eigene Erhebungen TFZ [29]. Preise inklusive der jeweiligen Mehrwertsteuer, sofern erhoben

Noch größer sind die Kostenvorteile, wenn nicht zugekauft Scheitholz verwendet wird, sondern eine Beschaffung aus eigenem oder fremden Waldbesitz mit ggf. eigener Aufbereitung gegeben ist. Diese "kostenlose Beschaffung" stellt auch heute noch die überwiegende Rohstoffquelle der Haushalte in Deutschland dar (Abb. 3). Nur eine Minderheit "kauft" den Brennstoff zu, wobei in diesem Fall der Forstbetrieb und Privatbezug deutschlandweit als wichtigste Bezugsquelle zu nennen sind (Abb. 3). Neuere Zahlen zeigen, dass der "kostenlose Bezug" abnimmt; für Gesamtdeutschland wird er in 2005 nur noch mit 55% angegeben [5]. Hier wirkt sich offenbar der insgesamt steigende Holzverbrauch dahingehend aus, dass die neuen Nutzer von Brennholz oft keine Möglichkeit oder keine Bereitschaft zur Selbstwerbung im Wald besitzen und daher auf Fremdbelieferung angewiesen sind. Das zeigt auch der für 2005 genannte Marktanteil des "Handels" und der "Märkte", der in Summe für Gesamtdeutschland mit 11% angegeben wird [5]. Anders als in

Abb. 3 bezieht sich diese Angabe auf den gesamten Scheitholzverbrauch und stellt somit eine Steigerung gegenüber 2003 dar.

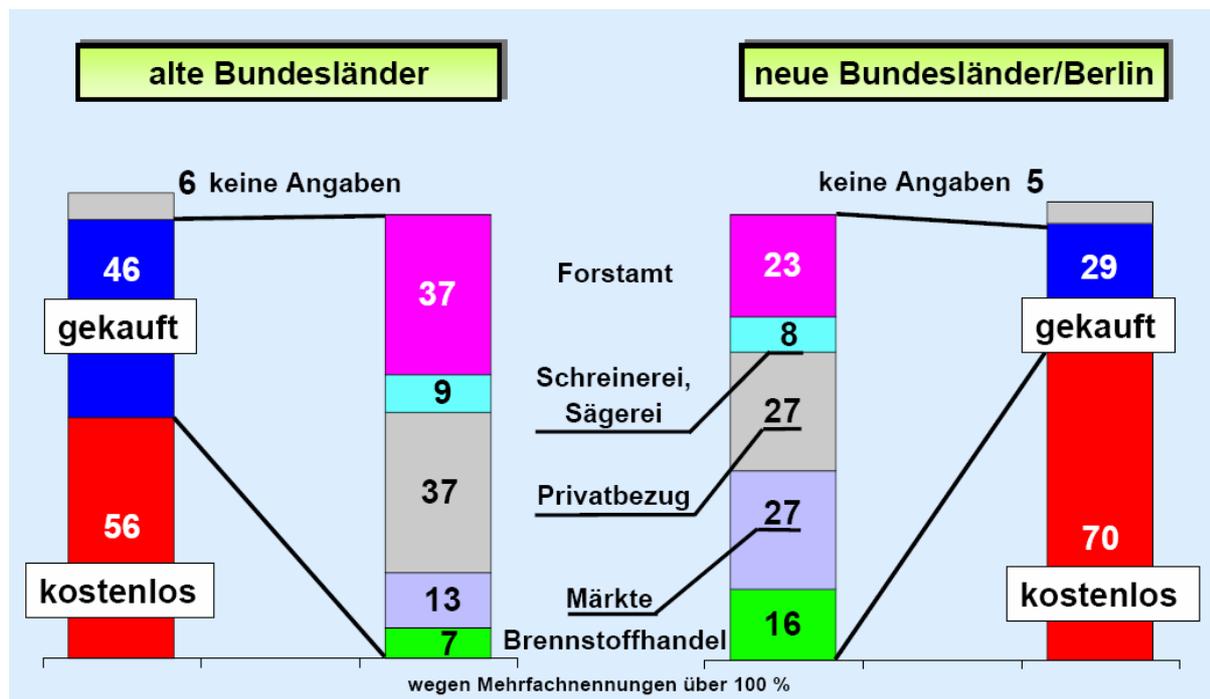


Abb. 3: Bezugsquellen für Holz in 2003. Angaben der Haushalte mit Holzeinsatz in Prozent [2]. Grafik: Rheinbraun Brennstoff GmbH. Datenquelle: GFK Panel Services, Nürnberg

Der Gesamtverbrauch an Scheitholz in Deutschland wird für 2005 mit 12,98 Mio. t angegeben, wobei gegenüber 2004 lediglich ein 2%-iger Anstieg festzustellen ist [5], obgleich angesichts des danach eingetretenen starken Anstiegs der Heizölpreise hier auch eine größere Steigerung zu erwarten gewesen wäre. Hierin ist auch ein Beleg für die Tatsache zu erkennen, dass das Scheitholzangebot bisher offenbar sehr unelastisch auf eine mutmaßlich gestiegene Nachfrage nach offenfertigem Brennstoff reagiert. Vermehrte Meldungen über Scheitholzknappheit im Scheitholzhandel und ausverkaufte Lager bereits im Herbst 2004 und 2005 belegen diese Behauptung.

Der Grund für diese geringe Flexibilität des Holzangebotes ist vielschichtig. Zum einen ist er in der Tatsache zu sehen, dass für Scheitholz eine ca. 1- bis 2-jährige Lagerdauer gefordert wird, weshalb eine Nachfragesteigerung nach offenfertigem Holz frühestens nach ca. zwölf Monaten angebotswirksam werden kann, zumal Trocknungsanlagen für Scheitholz, die einen Nachfrageüberhang relativ kurzfristig ausgleichen könnten, derzeit kaum existieren.

Zum anderen handelt es sich bei der Scheitholzbereitstellung meist immer noch um eine relativ arbeitsintensive Produktionsweise, so dass die Ausweitung des Angebotes oft an der Verfügbarkeit von preiswerten Arbeitskräften scheitert. Hinzu kommt, dass es sich meist um eine vergleichsweise schwere Arbeit handelt, bei der eine Produktionsausweitung oft auch an physische Grenzen stößt. Der relativ große Lagerraum bzw. die Lagerfläche, die für die Bevorratung größerer Mengen erforderlich ist, stellt ebenfalls einen limitierenden Faktor dar.

2 Problemstellung

In den letzten Jahren ist ein Ansteigen der Nachfrage für Scheitholz als Brennstoff erkennbar. Das führte unter anderem dazu, dass "ofenfertiges" Scheitholz bei den meisten Anbietern schon vor Beginn des Winters ausverkauft war, so dass keine weitere Ware mehr für die Deckung der gestiegenen Nachfrage bereit stand und auch kurzfristig nicht mehr beschafft werden konnte, da eine Warmlufttrocknung von Scheitholz in der Praxis eher eine Ausnahme darstellt. Tendenziell führt diese Marktsituation zu einer Verteuerung des Brennstoffs, die sich seit etwa drei Jahren schon abzuzeichnen beginnt (vgl. Abb. 2) und auch bei einem Vergleich mit einer Preisermittlung im Jahr 1997 [26] festzustellen ist.

Diese bisherigen und zukünftig zu erwartenden Preiserhöhungen sowie der aktuelle Nachfrageüberhang sind plausibel angesichts der Tatsache, dass die Herstellung von Scheitholz nach wie vor oft noch mit hohem Arbeitszeitaufwand und relativ geringem Mechanisierungsgrad erfolgt. Hinzu kommt, dass das Waldeigentum zu über 60% [53] mit landwirtschaftlichen Betrieben verbunden ist, in denen der Arbeitskräfteeinsatz im Zuge des laufenden landwirtschaftlichen Strukturwandels immer mehr abgenommen hat. Somit kann die Aufrechterhaltung oder gar Ausweitung der bisherigen Scheitholzproduktion nur durch zunehmende Rationalisierung der Produktion erfolgen. Durch Einführung bzw. Verbreitung effizienter und rationeller Bereitstellungsverfahren könnte die beobachtete Steigerung der Scheitholznachfrage zukünftig auch zu vernünftigen Preisen befriedigt und somit Versorgungsengpässe vermieden werden.

Da es sich bei der Scheitholzbereitstellung um eine besonders feingliedrige Verfahrenskette mit einer großen Anzahl von Teilverfahrensschritten handelt (z. B. Grobzerkleinern im Wald, Rücken, Stapeln, Laden, Transportieren, (Zwischen-)lagern, Trocknen, Spalten, Sägen, Umschlagen, Endtransport, Endablage), sind viele Eingriffsmöglichkeiten und Optimierungsansätze möglich. Die Bereitstellung kann auf unterschiedliche Art erfolgen (Abb. 4). Dies zeigt sich schon bei der Holzernte, die mit unterschiedlichen motormanuellen Verfahren und darüber hinaus auch mittels eines Harvesters durchgeführt wird. Das Rücken, also das Befördern des Holzes aus dem Bestand an die Waldstraße, kann ebenfalls unterschiedlich gestaltet werden: von Hand, mit Pferden oder mit Loiten (Rutschen am Hang), teilmechanisiert unter Zuhilfenahme einer Seilwinde oder sogar vollmechanisiert mit einem Forwarder. Die Aufarbeitung wie die Lagerung kann am Waldweg, am Aufarbeitungsplatz oder beim Kunden geschehen. Sie kann traditionell mit Motorsäge, der Axt oder einem Spalthammer ausgeführt werden oder mit kleinen oder großen hydraulischen Spalter und weiter auch mit großen oder kleinen kombinierte Säge-Spaltmaschinen. Für den Transport werden LKW, Traktorengespanne oder PKW mit Anhänger verwendet. Bei der Lagerung kann das Scheitholz geschichtet oder geschüttet, abgedeckt oder nicht abgedeckt sein.

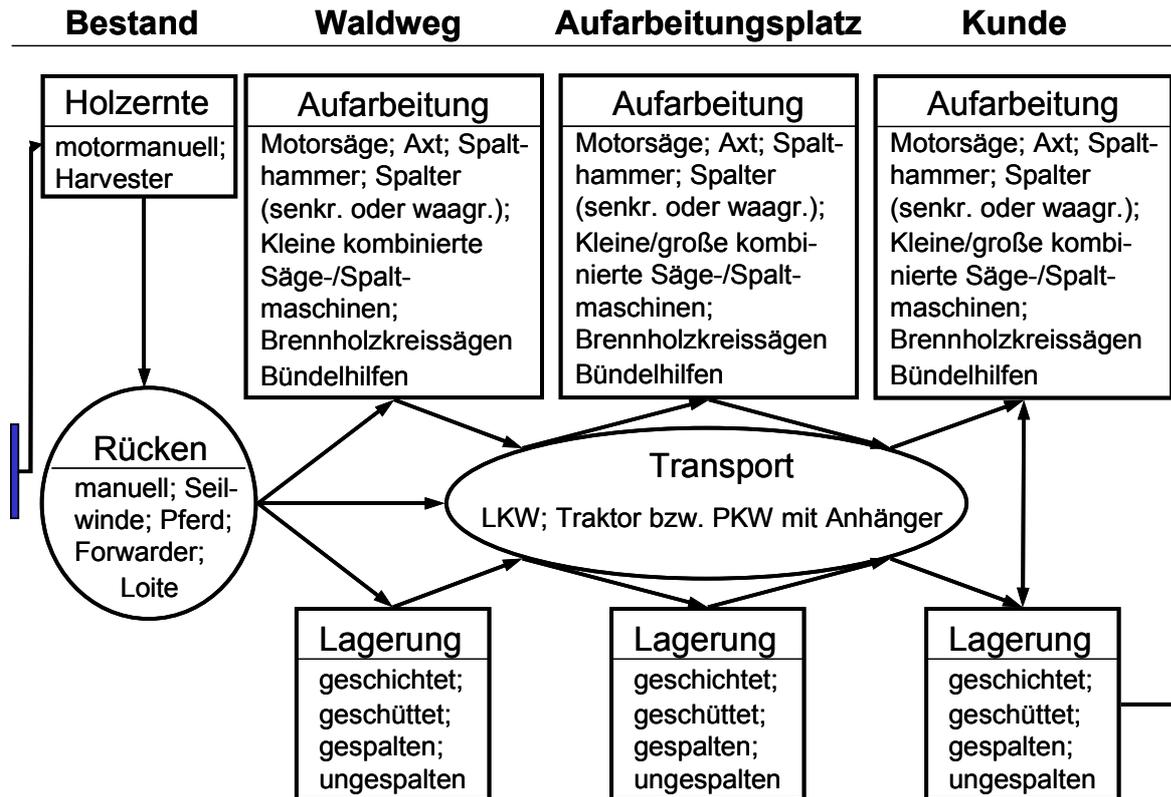


Abb. 4: Schema der unterschiedlichen Logistikpfade bei der Bereitstellung von Scheitholz

In der Ausgestaltung der Verfahrenskette und gegebenenfalls der weiteren Mechanisierung liegen somit beträchtliche Möglichkeiten für eine Optimierung und damit Kostensenkung und Produktivitätssteigerung der Scheitholzproduktion. Die Bewertung und Identifikation solcher Möglichkeiten erfordert allerdings eine differenzierte Bestandsaufnahme der Bewertungskenngrößen für die einzelnen Verfahrensabschnitte und Anwendungsfälle. Beispielsweise sind hierfür konkrete Planungszahlen für eine Beurteilung des Arbeitszeitbedarfs bzw. der Produktivität der Brennholzernte und -aufbereitung sowie des Brennholzumschlags und des Transports je nach betrachtetem Mechanisierungsverfahren erforderlich. Auch zum Energieverbrauch werden geeignete holzmengenspezifische Planungszahlen benötigt. Derartige Daten liegen jedoch für die Scheitholzproduktion derzeit nicht vor.

Ebenso wenig kann zur Zeit objektiv festgestellt werden, in wie weit die einzelnen Produktionsverfahren mit besonderen körperlichen oder gesundheitlichen Belastungen durch die Schwere der zu leistenden Arbeit verbunden sind bzw. welche Erleichterungen ein erhöhter Mechanisierungsgrad hierbei gegebenenfalls mit sich bringen würde. Auch in der Arbeitsschwere, die gemeinhin als relativ hoch eingeschätzt wird, ist ein Hemmnis für den weiteren Ausbau der Scheitholzproduktion zu sehen, so dass verbesserte Kenntnisse und daraus abgeleitete Optimierungsansätze auch in diesem Bereich wünschenswert sind.

Weitere Unsicherheiten und Kenntnislücken bestehen bei der Lagerung. In Scheitholzfeuerungen ist grundsätzlich trockenes Holz zu verwenden, das heißt, das Holz muss so lange unter geeigneten Bedingungen gelagert werden, dass es bis zur Verwendung auf Wassergehaltswerte von unter 20% abgetrocknet ist. In diesem Zustand wird es gemäß der neuen Klassifizierungs-Vornorm

prCEN/TS 14961 [17] als "ofenfertiges Scheitholz" bezeichnet. Bei der Festlegung der hierfür erforderlichen Lagerdauer herrscht allerdings noch große Unsicherheit, da eine zuverlässige Feststellung des Wassergehalts insbesondere bei Scheitholz schwierig ist. In der Praxis wird als erforderliche Lagerungsdauer eine große Spannweite von Werten genannt, sie reicht von sechs Monaten bis zu drei Jahren (vgl. Tab. 35).

Nach der Lagerung wird das Holz in der Einheit Raummeter verkauft, wobei es für dieses Maß keine einheitliche Definition gibt. Daher können mit dem Raummeter entweder gestapelte Rundlinge oder gespaltene Meterscheite gemeint sein, auch gestapelte oder sogar geschüttete Kurzscheite werden als Raummeter verkauft, wobei es unzweifelhaft erscheint, dass sich die darin enthaltene Masse (und damit auch die Energiemenge) je nach Sortiment zum Teil deutlich unterscheidet. Einheitlich anerkannte Umrechnungsfaktoren zwischen den Sortimenten fehlen, auch über den möglichen Einfluss der verschiedenen Holzarten auf die Volumenmaße ist nichts bekannt. Für einen zunehmend professionelleren und überregionalen Scheitholzmarkt sind derartige Umrechnungszahlen aber unbedingt erforderlich, da nur dadurch ein objektiver Vergleich der Verkaufspreise für Scheitholz möglich ist.

Für eine Weiterentwicklung des Scheitholzmarktes sind somit zunächst eine Vielzahl von Kenntnislücken zu schließen und geeignete belastbare Planungszahlen zu erarbeiten. Mit dem hier durchgeführten Forschungsprojekt soll dazu ein Beitrag geleistet werden. Das Fehlen solcher systematisch erarbeiteter Daten belegt, dass die Bedeutung des Scheitholzes für die Bioenergienutzung in den letzten Jahren deutlich unterschätzt wurde.

3 Zielsetzung

Ziel der Untersuchung ist die Bewertung und Optimierung von Produktionsverfahren für Scheitholz und die Erarbeitung der hierfür relevanten Planungs- und Kalkulationsdaten. Allerdings ist die Scheitholzproduktion in vielen Varianten möglich, die zudem vielerlei Einflüssen unterliegt und für die eine Vielzahl von Produktkennwerten zu berücksichtigen sind. Daher ist eine systematische Abgrenzung des Betrachtungsrahmens erforderlich. Hierzu bietet ein sogenanntes "Input-Output-Modell" eine schematische Darstellungsmöglichkeit. In Abb. 5 wird ein solches Modell auf den Bereich der Scheitholzbereitstellung angewendet. Es stellt den Produktstrom vom Rohholz zum Endprodukt dar, der grob in die Teilverfahrensschritte Ernte, Aufbereitung, Transport und Lagerung untergliedert werden kann und auf den verschiedene Umwelteinflüsse wirken. Dieser Produktstrom kann durch diverse Prozesskennwerte beschrieben werden und das Endprodukt Scheitholz ist durch verschiedene Produktmerkmale gekennzeichnet (Abb. 5).

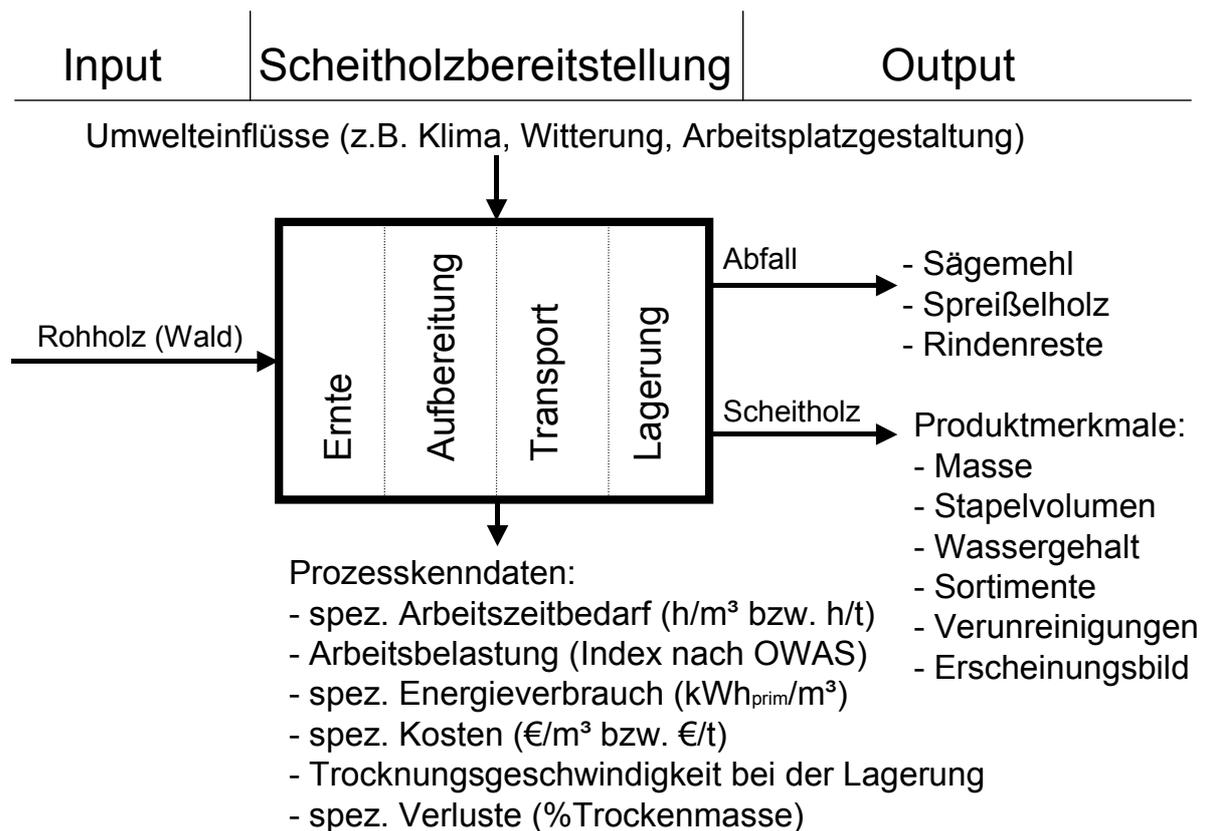


Abb. 5: Input-Output-Modell für die Scheitholzbereitstellung

Die in Abb. 5 dargestellten Prozesskennwerte sowie einige der unter "Produktmerkmale" aufgelisteten Parameter stellen den Untersuchungs- und Bewertungsgegenstand in der vorliegenden Arbeit dar.

Im Einzelnen werden für diese Bewertung die folgenden Zielgrößen ausgewählt:

- Arbeitszeitbedarf
- Arbeitsschwere
- Energieverbrauch
- Kosten

und beim Scheitholz selbst:

- Trocknungsgeschwindigkeit (bei der Lagerung)
- Trockenmasseverluste (bei der Lagerung)
- Stapelvolumen

Den Schwerpunkt der Messungen bilden die Arbeitszeitstudien. Hierbei kommt es vor allem darauf an, dass die Aufnahmen den praktischen Betrieb so realistisch wie möglich in Zahlen abbilden und ihn dabei so gering wie möglich beeinflussen, um eine bestmögliche Aussagefähigkeit zu erreichen. Damit die Vielfalt der Arbeitsverfahren und deren Varianten abgedeckt werden kann, soll eine große Anzahl von Zeitstudien an unterschiedlichen Geräten, zum einen von der Holzernte von sogenannten Selbstwerbern und zum anderen von der Scheitholzproduktion, durchgeführt werden. Die Selbstwerber und nicht der professionelle Forstwirt soll untersucht werden, da ein Selbstwerber in der Regel für den Erwerb von Brennholz im Wald arbeitet.

Insgesamt sollen nach Möglichkeit produktmengenspezifische Kenndaten bestimmt werden, das heißt, dass bei den Messungen und Erhebungen in der Praxis stets auch der Massenstrom mit zu erfassen ist, auf den sich die Messungen letztlich beziehen sollen.

Dem Einfluss des Rohstoffs soll dadurch Rechnung getragen werden, dass stets versucht wird, mindestens die Holzarten Fichte und Buche (als Vertreter für die Kategorien Nadel- bzw. Laubholz) zu untersuchen. Außerdem wird der mögliche Einfluss verschiedener Holzdurchmesser bei der Holzernte- und Aufbereitung geprüft.

Neben den spezifischen Prozesskenndaten soll auch der unspezifische Faktor der Arbeitsbelastung erhoben werden und in die Gesamtbewertung einfließen. Alle Arbeitsabläufe der Scheitholzerzeugung – von den einzelnen Ablaufabschnitten bis hin zu zusammengesetzten Teilverfahren – sollen dabei untersucht und mit der OWAS-Methode in sogenannte Maßnahmenklassen eingeteilt werden (OWAS = Ovako Working Posture Analysing System). Dieser abstrakte Index soll nach Möglichkeit eine allgemeinverständliche Zuordnung und Bewertung überführt werden, so dass daraus Empfehlungen zur Verbesserung einzelner Arbeitsablaufabschnitte abgeleitet werden können.

Für eine Gesamtbewertung ist auch der Energieverbrauch von Bedeutung. Dieser wird parallel zu den Arbeitszeitstudien gemessen, dass letztendlich der spezifische Energiebedarf je Maßeinheit Brennstoff zugeordnet werden kann.

Da ein Mangel von Scheitholz am Markt unter anderem die Folge von langen Lagerzeiten ist, soll die Planungssicherheit durch die exakte Ermittlung der Trocknungsgeschwindigkeit gesteigert werden, denn nur Scheitholz mit dem Produktmerkmal „unter 20% Wassergehalt“ sollte verbrannt werden und in den Handel für den Endkunden gelangen. Für die Gesamtbewertung des Produkts Scheitholz ist daher die Lagerdauer ein entscheidendes Kriterium. Dabei müssen bei der Bestimmung einer Mindesttrocknungsdauer Einflüsse der Baumart, des Standorts, der Lagergestaltung

berücksichtigt werden. Da hierbei auch Umwelteinflüsse wie das Klima oder auch jährliche Schwankungen beim Wetter eine Rolle spielen, muss die Lagerung daher in zwei verschiedenen Klimagebieten Bayerns und in verschiedenen Lagerperioden messtechnisch begleitet werden.

Ferner ist bei einer Lagerung auch von Interesse, ob und wie hoch ein Trockenmasseverlust auftritt und damit für eine Gesamtbewertung eine relevante Größe darstellt. Deshalb sollte er ermittelt werden.

Das Stapelvolumen stellt im eigentlichen Sinn lediglich ein Produktmerkmal dar, es wird jedoch für die Umrechnung von Rohholzmaßen (Festmeter) zu Verkaufsmaßen (z. B. gestapelte Rundlinge, Meterscheite oder geschüttete Kurzscheite) der einzelnen Sortimenten benötigt, so dass eine nach Holzarten und Sortimenten differenzierte und belastbare Feststellung der Umrechnungsfaktoren hier ebenfalls erfolgen muss, da für die Praxis aber auch für die hier durchzuführenden Berechnungen sonst keine geeigneten Daten verfügbar sind.

Diese Bewertung soll zum einen separat für die Teilverfahrensschritte der Prozesskette durchgeführt werden (z. B. Holzernte im Wald, Spalten mit Senkrechtpalter, Lagerung im Freien), zum anderen soll aber auch für ausgewählte Zielgrößen eine Betrachtung von Modellverfahrensketten, in denen sämtliche Teilverfahrensschritte aggregiert wurden, durchgeführt werden. Für die Ermittlung solcher Modellverfahrensketten soll eine Umfrage bei Brennholzproduzenten durchgeführt werden, um die in der Praxis gängigen Verfahrensketten darzustellen, die anhand der gemessenen Teilverfahrensschritten dann bewertet werden können.

Zusammenfassend soll die vorliegende Untersuchung folglich auf dem wissenschaftlich bislang kaum bearbeiteten Gebiet der Scheitholzbereitstellung wichtige Kenntnislücken schließen und belastbare Planungszahlen erarbeiten.

4 Methoden

4.1 Arbeitszeitbedarfsbestimmung

4.1.1 Die Methode nach REFA

Zeitstudien zur Arbeitszeitbedarfsbestimmung stellen ein arbeitswissenschaftliches Instrument zur Erfassung und Optimierung von Arbeitsabläufen dar. In der vorliegenden Untersuchung wurde die Methode für forstliche Zeitstudien nach REFA (Verband für Arbeitsstudien und Betriebsorganisation e.V.) angewandt. Hierbei werden die zu untersuchenden Arbeitsabläufe beobachtet und anschließend in Arbeitsablaufabschnitte unterteilt. Diese müssen exakt beschrieben und für jeden Zeitnehmer eindeutig sein. Im weiteren Verlauf werden dann die benötigten Zeiten mit einem Aufnahmegerät erfasst. Zusätzlich ist hierzu aber auch die Erfassung des Materialflusses notwendig, um spezifische Kenngrößen ermitteln zu können, beispielsweise den Arbeitszeitbedarf für einen Raummeter Rundlinge. Da parallel zur reinen Zeiterfassung auch der ebenfalls erfasste Energieaufwand (Kapitel 4.3) sowie Daten zur Belastung der arbeitenden Person aufgezeichnet wurden, lassen sich diese Messungen somit einem bestimmten Output (Holzmenge) zuordnen und in Form eines spezifischen Wertes auswerten.

Es wurde versucht, die im Rahmen des Projekts durchgeführten Arbeitsstudien im Bereich der motormanuellen Brennholzaufarbeitung möglichst praxisnah zu konzipieren und durchzuführen, wobei die im forstlichen Arbeitsstudium üblichen Methoden verwendet und die Ergebnisse entsprechend ausgewertet wurden. Die den Arbeitsstudien zugrunde liegende Methodik entsprach der von REFA [39] empfohlenen Vorgehensweise. Die beobachteten Zeiten wurden mit mobilen Datenerfassungsgeräten festgehalten. Hierzu wurden Handheld Computer (Handera™ bzw. Palm™ 515 mit 64 MB SD-Karte und einer Zeitstudiensoftware UMT und STATUMT von Laubress inc.), die auch als "PDA" (Personal Digital Assistant) bezeichnet werden, eingesetzt. Die Gesamtarbeitszeit (GAZ) wurde in einzelne Arbeitsabschnitte gegliedert und, soweit möglich, getrennt nach Bearbeitungseinheiten (z. B. gefällte Bäume) aufgenommen. Die Ablaufabschnitte lassen sich in Reine Arbeitszeit (RAZ) und Allgemeine Zeiten (AZ) untergliedern. Die Reine Arbeitszeit setzt sich aus den Zeiten zusammen, die ausschließlich durch den betreffenden Arbeitsgegenstand verursacht werden. Die Allgemeinen Zeiten stehen dagegen mit der Bearbeitungseinheit entweder überhaupt nicht im Zusammenhang oder sie können dieser nicht zugeordnet werden, da sie unregelmäßig auftreten und nicht unmittelbar zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe dienen. Sowohl die Zeitdaten als auch die Daten des ausscheidenden Bestandes wurden im PDA gespeichert. Nach der Datenübertragung an einen stationären PC bzw. an einen Laptop wurden die Daten mit Hilfe einer Excel-Standardsoftware weiter ausgewertet. Dabei wurden Volumen, Brusthöhendurchmesser (BHD) und Mittendurchmesser in Bezug zu den Zeitdaten gesetzt, anschließend wurden Leistungsrechnungen erstellt. Das Konzept der Datenaufnahme und -auswertung ist in Abb. 6 dargestellt.

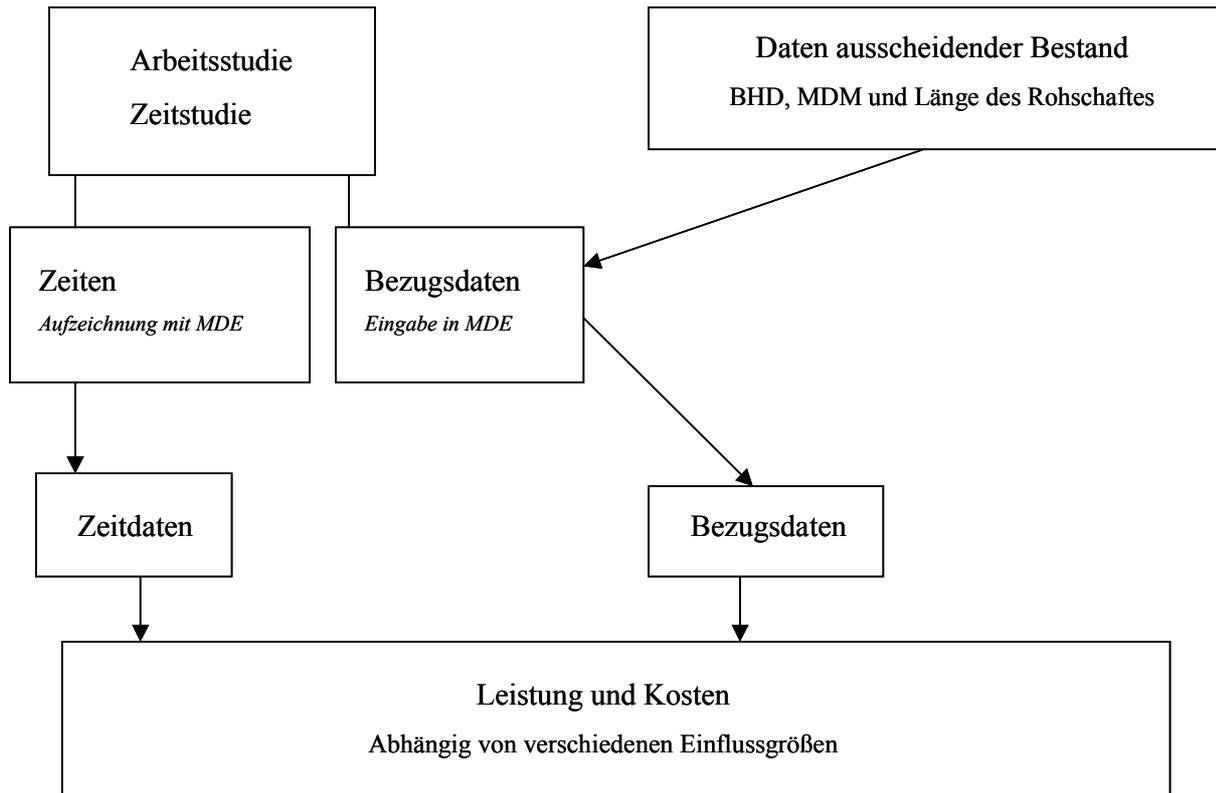


Abb. 6: Konzept der Datenaufnahme und -auswertung in den durchgeführten Arbeitstudien (BDH Brushhöhendurchmesser, MDM Mittendurchmesser, MDE Mobile Datenerfassung)

4.1.2 Verwendete Hilfsmittel

Arbeitszeitbedarfsbestimmung mit dem PDA. Für forstliche Zeitstudien stehen heute neben speziell entwickelten mobilen Datenerfassungsgeräten auch so genannte PDA's (Personal Digital Assistant) zur Verfügung. Der PDA, auch "Organizer" genannt, ist ein handliches Gerät, um Termine und Kontakte zu verwalten. Durch eine spezielle Zusatzsoftware lassen sich damit auch gezielt Arbeitszeitstudien durchführen. Im Vergleich zu speziellen Industrieanwendungen ist diese Variante kostengünstiger.

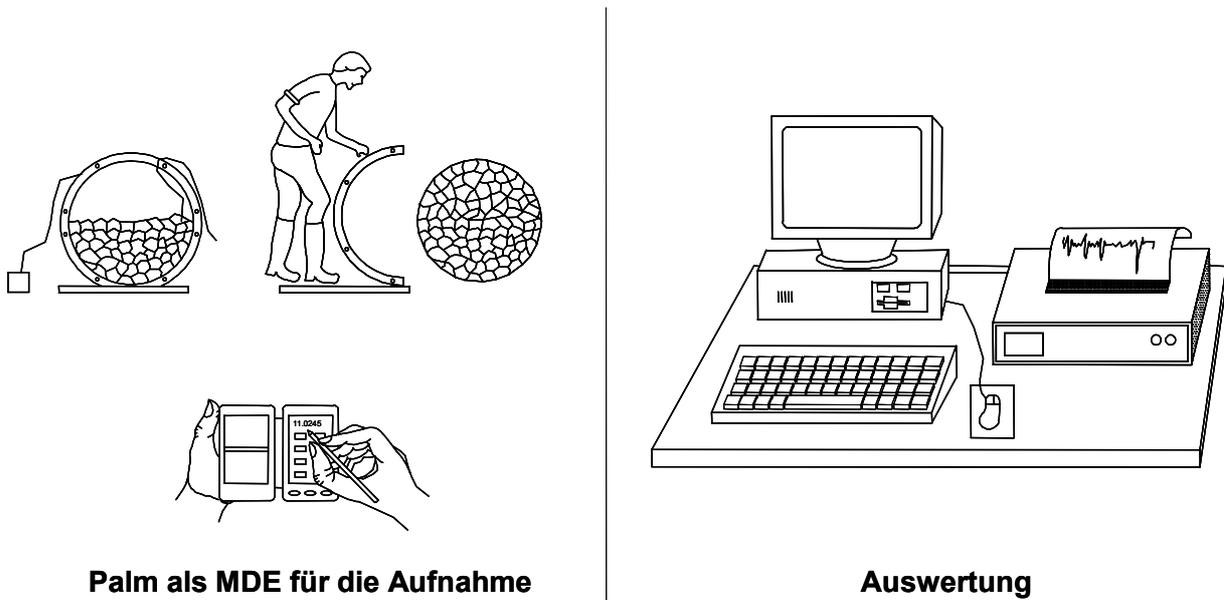


Abb. 7: *Durchführen der Arbeitszeitbestimmung mit PDA und PC*
MDE Mobile Datenerfassung

Hardware. Für den reibungslosen Ablauf einer Zeitstudie stellt die Robustheit des Gerätes bei Anwendungen im Freien eines der wichtigsten Kriterien dar; es muss etwaige Stürze und Schläge verkraften können. Für einen Einsatz im Wald oder bei der Holzverarbeitung ist außerdem eine Unempfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeit oder Staub erforderlich. Um diese Eigenschaften auch für einen PDA zu erreichen, wurde ein so genanntes "Aquapack", eine verschließbare Plastikhülle (oder auch eine Hardcasecassette aus Kunststoff) verwendet. Darin wurde der PDA wasserdicht eingepackt. Die Akkulaufzeit des PDA erlaubte ausreichend lange Betriebszeiten ohne zusätzlichen Akkuwechsel oder Ladezyklus, somit konnte die Zeiterfassung lückenlos erfolgen und eine gesamte Tagesschicht umfassen. Es wurde jeweils ein PDA der Firmen PalmTM und HanderaTM verwendet, beide besaßen eine hohe Anzeigequalität, so dass die Ablesung auch bei starker Sonneneinstrahlung gut möglich war. Zusätzlich verfügten sie über eine Beleuchtungsfunktion für den Einsatz bei einsetzender Dämmerung oder Nebel.

Software. Bei forstlichen Arbeitsstudien kommen nach REFA normalerweise drei verschiedene Verfahren zum Einsatz, das Einzelzeitverfahren, das Fortschrittszeitverfahren und das Multimomentverfahren. Eine Software, die für alle drei Verfahren eingesetzt werden kann, wurde nach einer umfangreichen Marktsichtung beschafft, es handelte sich um das englischsprachige Softwarepaket UMT (Hersteller: Laubress, Canada), welches geeignete Zeiterfassungsfunktionen besitzt, die eine Anwendung auch auf den Prozess der Brennholzgewinnung erlauben. Die Software wird unter dem Betriebssystem Palm OS betrieben. Für die Arbeitzeiterfassung werden zunächst die gewünschten Ablaufabschnitte am PC konfiguriert, indem die für die eigentliche Zeitstudie und Datenerfassung mit PDA relevanten Eingabefelder definiert werden. Zusätzlich sind jedem Eingabefeld Attribute zuzuordnen, beispielsweise ist festzulegen, ob das Betätigen eines Feldes das Ende oder den Anfang dieses Ablaufabschnittes markiert, oder ob dieser Abschnitt zu einem bestimmten Prozentsatz verlangsamt in die Gesamtrechnung eingehen soll. Ferner ist auch eine Zuordnung zu einer vorher definierten Kategorie möglich. Die so am PC festgelegte Konfiguri-

on wird auf den PDA, mit dem die eigentliche Zeitmessung und Datenerhebung vor Ort durchgeführt wird, übertragen. Die Dauer der einzelnen Ablaufabschnitte wird von der Systemuhr des PDA gemessen und über eine entsprechende Berührung auf dem jeweiligen vordefinierten Arbeitsablaufabschnittseingabefeld des Touchscreens gestoppt (Abb. 8). Zusätzliche Eingaben von parallel bestimmten Bezugsdaten und -mengen, wie beispielsweise der Brusthöhendurchmesser (BHD) oder zusätzlich gemessene Einzelmassen, erfolgten phasenkonform über ein entsprechendes Nummern- bzw. Textfeld. Diese Angaben wurden durch die frei definierte Einstellung bei der Datenerfassung automatisch abgefragt. Darüber hinaus bot der PDA von Handera die Möglichkeit, Beobachtungen während der Studie über die integrierte Diktierfunktion oder direkt in einem Kommentarfeld festzuhalten. Eine Zuordnung und eventuelle Korrektur ist somit problemlos möglich. Neben dem PDA benötigte der Zeitnehmer für die Datenerfassung keine weiteren Hilfsmittel während der Messung vor Ort.



Abb. 8: *Benutzung eines PDA zur Zeiterfassung in den Versuchen*

4.1.3 Die Definitionen der einzelnen Arbeitsablaufabschnitte

Im folgendem werden die Arbeitsablaufabschnitte für die beiden Teilbereiche der Holzernte und der Scheitholzaufbereitung definiert. Zur Scheitholzaufbereitung zählt auch das Umschichten und Stapeln von Hand. Nicht messtechnisch begleitet wurden dagegen die übrigen logistischen Teilverfahrensschritte wie das Laden mit Kran, die Transporte sowie das Abladen am Aufarbeitungsplatz oder beim Kunden. Diese für die Prozesskettenanalyse benötigten Daten konnten durch Nebenrechnungen auf Basis realistischer Annahmen oder durch Verwendung anderer Datenquellen hinreichend genau abgeschätzt werden (vgl. hierzu Kapitel 5.9).

4.1.3.1 Untersuchungen zur Brennholzernte (Selbstwerber)

Bei der Brennholzernte ist die Vielfalt der Rahmenbedingungen, Holzflächen und -arten und vor allem auch der beteiligten Akteure besonders groß. Die Ernte wird von professionellen Unternehmern aber auch von privaten und kleingewerblichen Personen, den so genannten "Selbstwerbern", durchgeführt. Professionelle Unternehmer sind häufig vorrangig an der Bereitstellung von Industrieholzsortimenten interessiert, hierzu liegen bereits umfangreiche Arbeitszeituntersuchungen vor (vgl. u.a. [60] und [43]). Da derartige Industrieholzsortimente prinzipiell – und in jüngster Zeit zunehmend häufiger – auch zu Brennholz weiterverarbeitet werden, kann für diesen Weg der Brennstoffbereitstellung auf vorhandene Zeitdaten zurückgegriffen werden.

Bislang kaum untersucht ist dagegen die direkte Brennholzernte durch Selbstwerber. Solche Privatpersonen erhalten von einem Waldbesitzer oder von der Forstverwaltung eine bestimmte Fläche, das sogenannte „Flächenlos“, zugewiesen. Auf diesem Flächenlos sind die zu fällenden Bäume vom Förster bereits markiert [25]. Wegen der hierzu bestehenden Datenlücken wurden zu diesen Selbstwerbearbeiten verschiedenen Zeitstudien in verschiedenen Beständen durchgeführt, wobei diese Untersuchung sich auf die Jungdurchforstung (JD) bezog. Nicht betrachtet wurden dagegen bereits geerntete Flächen mit Ernterückständen ("Schlagabraum"). Eine Zusammenstellung aller Merkmale der in diesen Zeitstudien betrachteten Bestände und Probanden zeigt Anhang 10.1. Die Holzernte wurde mit der Motorsäge durchgeführt, wobei das Rundholz meist schon im Bestand abgelängt wurde. Das Vorliefern erfolgte von Hand. Verschiedene Baumarten wie Fichte, Kiefer, Esche und Buche wurden aufgenommen. Die Betrachtung endete bei der Ablage des Rundholzes an der Waldstraße.

Für die Zeitstudien zur Brennholzernte wurden zwei verschiedene akademisch vorgebildete Teilnehmer eingesetzt, die Messungen zur Aufbereitung (Kapitel 4.1.3.2) wurden dagegen stets einheitlich nur von einer der beiden Teilnehmer durchgeführt. Die verschiedenen Tätigkeiten der Teilnehmer wurden in einem Vorversuch getestet, dabei wurde auch eine geeignete Methode der Volumenmessung festgelegt und ein günstiger Aufenthaltsbereich für die Teilnehmer gewählt, um eine möglichst minimale Einflussnahme bei einer geringstmöglichen Gefährdung des Teilnehmers sicherzustellen. Die beobachteten Brennholz-Selbstwerber arbeiteten teilweise sehr unterschiedlich hinsichtlich ihrer Ausstattung und des Ablaufes der einzelnen Tätigkeiten. Dort, wo es möglich war, wurden die anfallenden Ablaufabschnitte einem Zyklus zugeordnet. Ein Zyklus umfasst in der Regel das Fällen und Aufarbeiten eines Baumes sowie das Vorliefern bis zur nächsten befahrbaren Rückegasse. War diese Zuordnung nicht möglich, so wurde auf eine Zyklenauswertung verzichtet und nur eine einfache Leistungsrechnung erstellt, das heißt z. B., dass die gesamte gefällte Holzmenge durch die benötigte Zeit geteilt wurde, um ein Maß für eine Leistung zu erhalten. Die Möglichkeit einer Leistungsangabe in Bezug auf den Brusthöhendurchmesser entfällt dabei. Im Vorfeld wurden anhand eines Vorversuchs beobachtete Ablaufabschnitte Rüsten, Sachliche Verteilzeit (SVZ), persönliche Verteilzeit, Gehen, Fällen, Asten Vorliefern und sonstige Zeiten und deren exakte Trennpunkte definiert. (siehe Anhang 10.1)

Da die hier durchgeführten Zeitmessungen nicht nur der Feststellung der Verteilung der Ablaufabschnitte dienten, sondern auch eine Feststellung der Leistung bei der Holzernte ermöglichen sollte, musste zu jedem Zyklus das bearbeitete Volumen (in Festmeter mit Rinde) ermittelt werden. Je nach gewähltem Verfahren werden für die Bestimmung des Volumens eines Baumes ein

oder mehrere Durchmesser sowie die Baumlänge benötigt [34]. Bei der Berechnung des Volumens nach Gleichung (1) benötigt man den Mittendurchmesser (nach HUBER [34]).

$$v = g_m * l [m^3] \quad (1)$$

wobei v das Volumen ist, g_m die Grundfläche (Querschnittsfläche) in der Mitte des Rundholzes und l die Länge des Baumes oder Rundholzes. Die SMALIAN'sche Formel [34] für die Volumenberechnung ist in Gleichung (2) angegeben.

$$v = \frac{(g_o + g_u)}{2} * l [m^3] \quad (2)$$

Dabei sind g_o und g_u die Grundflächen der jeweiligen Enden des Stammes oder Rundlinge. Je nach Messmöglichkeit wurde in der vorliegenden Untersuchung jeweils die eine oder die andere Volumenbestimmungsmethode verwendet. Die Durchmesser wurden forstlich mit der Kluppe bestimmt (Abb. 9), d. h. es wurde auf einen Zentimeter genau abgelesen, ab 20 cm Durchmesser oder bei besonders unförmigem Rundholz wurde eine Kreuzkluppung, d. h. eine zweifache um 90° versetzte Messung, vorgenommen.



Abb. 9: Elektronische Kluppe für die Durchmesserbestimmung

Bei der Längenbestimmung wurde ebenfalls unterschiedlich vorgegangen. Gemessen wurde das liegende Rundholz bis zu einem Zopfdurchmesser von 7 cm. Wenn der Waldarbeiter das Holz unmittelbar nach dem Trennschnitt ablängte, d. h. das Rundholz sofort in 1 m lange Stücke sägte, wurden die liegenden 1 m Rundlinge gezählt, um die gesamte Baumlänge festzustellen. Beim Ablängen war dabei mit einem Maßband der jeweilige Sägeschnitt festgelegt worden. Derartige Kompromisse bei der Wahl des Messverfahrens für die Längenbestimmung waren teilweise er-

forderlich, um den Arbeitsablauf durch die Messung nicht zu stören und um einen Aufenthalt der messenden Person im Gefahrenbereich der umfallenden Bäume zu vermeiden.

4.1.3.2 Untersuchung zur Scheitholzaufbereitung

Die Verarbeitung von Rundholz zu Brennholz (Scheitholz) kann auf sehr unterschiedliche Art erfolgen. In der Praxis reicht die Spannweite von der manuellen Arbeit mit Bügelsäge und Axt bis hin zum Einsatz moderner kombinierter Säge-Spalt-Maschinen. Um eine möglichst hohe verfahrensübergreifende Vergleichbarkeit der Messergebnisse zu gewährleisten wurde versucht, gemeinsame Arbeitsablaufabschnitte aller Verfahren zu identifizieren und zu messen: Hierbei handelt es sich um die Abschnitte "Holz holen", "Holz verarbeiten" und "Holz ablegen". Diese drei Arbeitsablaufabschnitte waren durchgehend zu allen Untersuchungen darstellbar. Nachfolgend werden die darüber hinausgehenden Ablaufabschnitte für die einzelnen Aufbereitungsverfahren separat zusammengestellt.

Spalten mit der Axt oder Spalthammer (33-cm-Rundlinge). Neben der Holzernte werden bei der Scheitholzproduktion auch heute noch vielfach eine Axt oder ein Spalthammer eingesetzt. Dabei gibt es zwei Möglichkeiten. Zum einen ist es die Zerkleinerung bereits gespaltener Scheite und zum anderen das Spalten von Rundholzrollen (eigentliches Scheitholzspalten). Bei beiden Tätigkeiten wird das zu bearbeitende Holz von einem Haufen in der Nähe des Hackstocks (ca. 2 m Entfernung) geholt, dann auf dem Hackstock auf die gewünschte Größe gespalten und anschließend in ein Lager (ca. 2 m Entfernung vom Hackstock) geworfen. Um die Spalt-Arbeitszeit bei dem noch ungespaltenen Holz genau der Produktmenge zuordnen zu können, wurde der Durchmesser des zu spaltenden Rundlings vom Probanden, d. h. vom Hackenden selbst, mit einer Kluppe gemessen. Dieser Zeitabschnitt wurde dann bei der Auswertung für die Leistungsermittlung nicht berücksichtigt. Es wurden Rundlinge mit einer Länge von 33 cm gespalten, wobei die Arbeitszeit für das Sägen separat erfasst wurde (siehe unten). Aus der Länge und dem Durchmesser der Scheite wurde das Volumen gemäß Gleichung (1) (Kapitel 4.1.3.1) errechnet. Die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim Spalten mit der Axt oder dem Spalthammer sind: Rüsten, PVZ, SVZ, Holz holen, Durchmesser ermitteln, Holz spalten, Holz ablegen sowie sonstige Zeiten. Im Anhang (Kapitel 10.1) sind diese aufgeführt und genau definiert.

Spalten mit dem kleinen Senkrechtpalter (33-cm-Rundlinge). Der Ablauf des Senkrechtpaltens ist dem Spalten mit der Axt sehr ähnlich. Als wesentlicher Unterschied ist zu nennen, dass der Arbeitsablaufabschnitt *Holz zurechtrücken* hier interessehalber separat erfasst wurde. Er ist kein eigener Arbeitsablaufabschnitt des eigentlichen Zyklus', d. h. er muss nicht zwingend auftreten wird aber zu der momentanen Zykluszeit hinzuaddiert. Dies hat den Vorteil, dass der Arbeitsablaufabschnitt „Holz spalten“ in zwei Arbeitsablaufabschnitte, nämlich „Holz spalten“ und „Holz zurechtrücken“ dargestellt und besser ausgewertet werden kann. Für die hier durchgeführte Untersuchung kam Spalter des Typs 6 SD der Firma Elektra Beckum zum Einsatz (zu den technischen Daten siehe Anhang 10.1). Eine Durchmesserverteilung der verwendeten Rundlinge ist in Kapitel 5.1.3.2 dargestellt. Die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim Spalten mit dem kleinen Senkrechtpalter sind: Rüsten, Holz holen, Durchmesser ermitteln, Holz zurechtrücken, Holz spalten, Holz ablegen, sonstige Zeiten. Im Anhang (Kapitel 10.1) sind diese aufgeführt und genau definiert.

Spalten mit dem großen Senkrechtpalter (1-m-Rundlinge). Bei der Arbeitszeitstudie mit dem großen Senkrechtpalter wurde das Volumen der einzelnen Rundhölzer schon vor Beginn der Arbeit ermittelt. Die Hölzer wurden mit einer Nummer versehen, die vom Zeitnehmer beim Arbeitsablaufabschnitt "Spalten" aufgezeichnet wurde. Eine Durchmesser- und Längsverteilung der verwendeten Rundlinge ist in Kapitel 5.1.3.3 dargestellt. Das noch ungespaltene Meterholz wird beim Senkrechtpalter mit Muskelkraft auf die Bodenplatte an der Spaltvorrichtung gestemmt. Beide Hände müssen nun den Hebel zum Ausfahren des Spaltkeils bedienen. Das gespaltene Holz fällt zu Boden und wird gegebenenfalls ein weiteres Mal gespalten. Danach wird es vom Boden aufgelesen und auf einen Stapel gelegt. In den durchgeführten Versuchen wurden zwei Geräte, der Edora Senkrechtpalter und der Spaltbrummi der Firma Vogesenblitz mit jeweils 16 t bzw. 25 t Spaltdruck, auf landwirtschaftlichen Betrieben untersucht (zu den technischen Daten siehe Anhang 10.1). Teilweise lieferte ein Arbeiter die zu spaltenden Rundhölzer an und bewerkstelligte auch das Aufsichten der verarbeiteten Holzscheite während ein zweiter Arbeiter nur spaltete. Aufgenommen wurde dann ausschließlich die Tätigkeit des Arbeiters an dem Spaltgerät. Bei den Berechnungen zur Produktivität des Verfahrens wurde jedoch die zweite Arbeitskraft mit berücksichtigt. Die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim Spalten mit dem großen Senkrechtpalter sind: Rüsten, Holz holen, Holz zurechtrücken, Holz spalten, Holz ablegen, Spalter versetzen und sonstige Zeiten. Im Anhang (Kapitel 10.1) sind diese aufgeführt und genau definiert.

Spalten mit dem Waagerechtpalter (1-m-Rundlinge). Bei der Arbeitszeitstudie mit dem großen Waagerechtpalter wurde das Volumen der einzelnen Rundhölzer ebenfalls schon vor Beginn der Spaltarbeiten ermittelt, die Hölzer wurden nummeriert, um vom Zeitnehmer zyklusnah aufgezeichnet werden zu können. Eine Durchmesser- und Längsverteilung der verwendeten Rundlinge ist in Kapitel 5.1.3.4 dargestellt. Das Rundholz wird beim Waagerechtpalter mit Muskelkraft auf die Hubswinge gelegt und hydraulisch nach oben in eine Wanne vor den Stempel geführt. Der Stempel drückt nun den waagrecht liegenden Rundling durch das Spaltkreuz. Die fertigen Scheite müssen mit der Hand von der Ablage zum Stapel transportiert werden. Meist arbeiten zwei Personen an einem Gerät; ein Maschinist und ein Zubringer. In der Untersuchung wurden Arbeiten an zwei verschiedenen Waagerechtpaltern durchgeführt. Dabei kamen der Splitmaster der Firma Posch und ein SP 30 HZH/S der Firma BGU zum Einsatz. Beide Untersuchungen fanden in landwirtschaftlichen Betrieben statt. Die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte sind: Rüsten, Beladen, Holz zurechtrücken, Stempelvorschub, Kreuz korrigieren, Spalter versetzen sowie sonstige Zeiten. Im Anhang (Kapitel 10.1) sind diese aufgeführt und genau definiert.

Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine. Bei diesen Maschinen wird Rundholz bis zu einem maximalen Durchmesser von 35 cm und bis zu einer maximalen Länge von vier Metern dem Sägeblatt oder Sägeschwert von Hand zugeführt. Nach dem Ablängen wird das Holz automatisch von einem Stempel durch ein Spaltkreuz gedrückt. Die so entstandenen Scheite werden von einem Förderband in einen Lagerbehälter (z. B. eine Gitterbox) transportiert. Die Untersuchungen fanden auf einem landwirtschaftlichen Betrieb und auf dem Gelände eines großen Brennholzhandels (Biomassehof Kempten) statt. Die Durchmesser- und Längsverteilung des in den Versuchen verwendeten Holzes ist in Kapitel 5.1.3.5 dargestellt. Es wurden zwei verschiedene Maschinen eingesetzt, ein Hakki Pilke EASY 2X und ein Posch Spaltfix 300, wobei an beiden Maschinen Holzlängen von 2 bis 4 m und etwa gleichen Durchmessern eingesetzt wurden. Die Hakki Pilke Maschine wird stationär mit elektrischem Strom betrieben. Sie besitzt an ihrem Zuführ-Förderband einen laderam-

penähnlichen Aufbau, der es ermöglicht einen Vorrat an Rundholz zu lagern. Damit ist es nicht erforderlich, dass das Holz manuell auf das Band gehoben werden muss. Lediglich die Beförderung des Rundholzes auf das Förderband erfolgt manuell durch Rollen. Das Förderband wird maschinell betrieben und dient dem Vorschub des Rundholzes. Das Ablängen geschieht dann mit einer installierten Kettensäge. Das abgesägte Holz fällt nach unten in eine von zwei Wannern, wobei automatisch einer von zwei Stempeln das Holz durch das verstellbare Spaltkreuz drückt. Das nun gespaltene Scheitholz fällt auf ein Förderband, welches das Holz in eine Gitterbox transportiert. In den Versuchen wurde mit beiden Maschinen ausschließlich Buchenholz aufbereitet. Beim Posch Spaltfix 300 handelt es sich um eine versetzbare Maschine, die an der Dreipunktaufhängung eines Traktors befestigt und von der Traktorzapfwelle angetrieben wird. Die Zeitstudie wurde direkt an einem Lagerplatz im Wald bei Temperaturen von -10°C durchgeführt. Statt wie bei den anderen Studien zur kleinen kombinierte Säge-Spaltmaschine das Rundholz mit Hilfe einer Laderampe auf das Förderband zu rollen, wurde es von einem weiteren Arbeiter auf das Band gehoben. Zum Ablängen ist das Gerät mit einer Kreissäge ausgestattet. Der abgesägte Rundholzzylinder fällt in eine Wanne worauf es ein Hydraulikstempel durch ein verstellbares Spaltkreuz drückt. Ein Förderband transportiert es dann auf einen Anhänger. Die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte bei den kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen sind: Rüsten, Beladen, Gitterbox wechseln, Fördern, Vorschub, Sägen sowie sonstige Zeiten. Im Anhang (Kapitel 10.1) sind diese aufgeführt und genau definiert. Der Arbeitsablaufabschnitt „Holz bearbeiten“, der bei anderen Geräten, wie z. B. den Spaltern „Holz spalten“ benannt ist, wurde zur genaueren Untersuchung in „Vorschub“ und „Sägen“, die in einem Zyklus mehrmals auftreten, unterteilt.

Große kombinierte Säge-Spaltmaschine. Ein großer Spaltautomat zersägt Rundholz mit bis zu 8 m Länge auf die gewünschte spätere Scheitholzlänge und spaltet die kurzen Rundlinge in einem nachfolgenden Arbeitsgang automatisch zu Scheiten. Das fertige Scheitholz wird anschließend mit einem Förderband in eine Gitterbox oder in das Holzlager befördert. Die große Säge-Spaltmaschine wird maschinell bestückt. Der Arbeiter befindet sich am Bedienpult. Die körperliche Anstrengung ist auf ein Minimum reduziert und beschränkt sich auf das Beheben von Störungen oder auf maschinelle (sachliche) Verteilzeiten (SVZ) wie das Wechseln der Kette oder Ähnliches. Im Zuge der Erhebung wurden zwei große Spaltautomaten untersucht. Zum einem der Herkules II der Firma Kretzer und zum anderen eine Maschine der Firma S&Ü (zu den technischen Daten siehe Anhang 10.1). Alle Untersuchungen fanden auf dem Gelände von großen Brennholzhändlern statt. Die Arbeitsablaufabschnitte beim Spalten mit der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine stimmen mit der oben genannten kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine überein, sie werden daher nachfolgend nicht mehr separat zusammengestellt. Die Durchmesserverteilung des in den Versuchen verwendeten Holzes ist in Kapitel 5.1.3.6 dargestellt.

Sägen mit der Brennholzkreissäge. Es gibt unterschiedliche Typen von Kreissägen. Für die Brennholzbearbeitung ist die Wippkreissäge besonders sinnvoll. Dabei wird das Brennholz in eine Wanne gelegt, die zum Sägeblatt hin und zurück gewippt wird. Mit der Brennholzkreissäge werden gespaltene Holzstücke auf die gewünschte Länge gesägt. In der Untersuchung wurden zwei Wipp-Kreissägen unterschiedlichen Fabrikats untersucht, wobei die Bedienperson jeweils alleine an der Maschine arbeitete. Die erste Kreissäge war eine WK 775 der Firma BGU. Die Zeitmessungen erfolgte auf einem landwirtschaftlichen Betrieb. Als zweite Kreissäge wurde eine BW 750 der Firma Elektra Beckum auf dem Betriebshof der TFZ-Dienststelle in Freising eingesetzt. Beide

Sägen fanden bei zwei verschiedenen Abläufen Anwendung. Zum einen wurden Meterscheite gekürzt (hier: auf 33 cm Länge), und zum anderen wurde Rundholz bis zu einem Durchmesser von 30 cm gekürzt, um es anschließend erst zu spalten (Spalten mit Axt, kleiner Senkrechtpalter). Die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim Sägen mit Brennholzsäge sind: Rüsten, Holz holen, Holz sägen, Holz ablegen, Gitterbox wechseln sowie sonstige Zeiten. Im Anhang (Kapitel 10.1) sind diese aufgeführt und genau definiert.

Bündeln mit einer Bündelhilfe. Das Bündeln der Scheite zu verkaufsfertigen Einheiten (0,5 oder 1 Rm) erfolgte mit einer runden Bündelhilfe (vgl. Kapitel 4.4). Damit werden die Scheite mit einem Meter Länge zu kreisrunden Bündeln zusammengeschnürt. Der Rahmen besteht aus einem kleinen Podest, an dem vier Bügel montiert werden, so dass sich ein rundes Gestänge ergibt, das die Scheite zu einem Raummeterbündel zusammenhält. Mit einem Gurt und einer Ratsche wird das Bündel eng zusammengezurt. Erst dann werden mit einem stabilen Garn zwei Wicklungen angelegt. Die Ratsche wird nun geöffnet, dann werden zwei Bügelhälften entfernt, damit das Holzbündel nun seitlich aus dem Podest gerollt werden kann. Nun wird die Bündelhilfe an einem anderen Ort wieder aufgestellt, und es kann das nächste Bündel entstehen. Die Arbeitsablaufabschnitte sind: Rüsten, Stapeln, Zurren, Schnüren, Kippen, Versetzen sowie sonstige Zeiten. Im Anhang (Kapitel 10.1) sind diese aufgeführt und genau definiert.

Holz schichten. Im Zuge der Versuche zur Bestimmung der Raummaße unterschiedlicher Sortimente (vgl. Kapitel 4.4) fielen umfangreiche Umschlags- und Stapelarbeiten an. Während dieser Arbeiten wurden Zeitmessungen zu diesen Arbeitsabläufen durchgeführt. Im Gegensatz zu den vorangehenden Arbeiten wurde hier mit der Stoppuhr gearbeitet. Ein Untergliedern in einzelne Arbeitsablaufabschnitte war nicht sinnvoll. Es wurden die Zeiten bis zum Auffüllen des Scheitholz-Messrahmens gemessen. Dadurch konnten die Arbeitszeiten in Bezug zur Menge gesetzt und die Produktivität errechnet werden.

4.2 Bestimmung der Arbeitsschwere

Zur Untersuchung der Arbeitsschwere bei der Scheitholzaufbereitung wurde sowohl eine empirische Untersuchung (Befragung), in der die subjektive Einschätzung interessierter Personen festgehalten wurde, als auch eine Messkampagne durchgeführt, in der anhand von Videoaufzeichnungen realer Verfahrensabläufe Messdaten generiert und ausgewertet wurden. Nachfolgend werden die beiden methodischen Ansätze vorgestellt.

4.2.1 Befragung von Experten und Laien

Um einen Anhaltswert und einen Vergleichswert zu der Methode der Arbeitsschwerebestimmung nach OWAS (vgl. Kapitel 4.2.2) zu erhalten, wurde eine mündliche Befragung zu den verschiedenen Arbeitsabläufen der Scheitholzproduktion durchgeführt. Verschiedene Methoden der Scheitholzbereitstellung (vgl. Kapitel 2) sollten nach der Höhe der Belastung gemäß dem jeweiligem subjektivem Empfinden des Befragten in fünf Stufen (sehr leicht, leicht, mittel, schwer, sehr schwer) eingestuft werden. Als Illustration wurden dem Befragten zusammen mit dem Fragebogen Fotos zum jeweiligen Arbeitsablauf vorgelegt. Die Befragten wurden willkürlich aus dem Umfeld des Bearbeiters ausgewählt (Studenten, Arbeitskollegen, Landwirte, Familienangehörige) wobei allerdings unterschieden wurde, ob sie in den untersuchten Bereichen Erfahrung hatten oder nicht. Es wurden insgesamt 60 Befragungen durchgeführt, bei denen es sich zur Hälfte um Personen handelte, die bereits mit den Arbeitsabläufen vertraut waren. Bei der anderen Hälfte handelte es sich um vollständige Laien.

4.2.2 Bestimmung der Arbeitsschwere nach OWAS

Die Bestimmungsmethode für die Arbeitsschwere nach OWAS (Ovako Working Posture Analyzing System) wurde vom finnischen Stahlwerk Ovako im Jahr 1974 entwickelt. Ziel war es, ein Schema zu entwickeln, welches alle denkbaren Arbeitshaltungen aufnimmt [55]. Später wurde das System auf andere Wirtschaftszweige wie Bergbau, Holz- oder Textilindustrie übertragen. So entstand ein standardisiertes Verfahren zur Analyse und Bewertung von Körperhaltungen bei der Arbeit.

Die OWAS-Methode kann in die Basis-OWAS-Methode und in die punktuelle OWAS-Methode unterteilt werden [54]. Mit der punktuellen Methode wird ausschließlich die Arbeit mit den Armen, z. B. bei einer sitzenden Tätigkeit, untersucht. Die Basis-OWAS-Untersuchung, welche in der vorliegenden Untersuchung angewandt wurde, kommt dagegen bei Arbeiten zur Anwendung, bei denen der Einsatz des ganzen Körpers erforderlich ist. Sie gibt Aufschluss über die

- angewendeten Arbeitshaltungstypen,
- den relativen Anteil der einzelnen Arbeitshaltungstypen,
- den Arbeitsablaufabschnitt, dem die Arbeitshaltungstypen zuzuordnen sind,
- Maßnahmen, die bei den einzelnen Arbeitshaltungstypen ergriffen werden müssen,
- die Verteilung der Arbeitshaltungen nach Körperteilen und
- die Belastungshöhe durch Gewicht oder Kraftbedarf.

Mit der Methode nach OWAS werden die Körperhaltungen nach 14 Grundstellungen in drei Gruppen unterschieden (Abb. 10): vier Rückenhaltungen, drei Armhaltungen und sieben Beinhaltenungen. Jede Haltung in einer Gruppe lässt sich durch eine Kennziffer ausdrücken, so dass sich die Körperhaltung insgesamt durch einen dreiziffrigen Bewertungscode beschreiben lässt. Aus den 14 Grundstellungen lassen sich somit durch unterschiedliche Kombinationen 84 verschiedene Körperhaltungen mit unterschiedlichen Zifferncodes charakterisieren, d. h. die erste Ziffer beschreibt die Haltung des Rückens, bei der zweiten Ziffer handelt es sich um die Armstellung und die dritte gibt Auskunft über die Beinsetzung. Ist das Gewicht des Gegenstandes, welchen der Proband trägt, bekannt, so wird zu dem 3-stelligen "Rücken-Arm-Bein"-Code noch eine vierte Ziffer hinzugefügt, es ist die "1" bei einem Gewicht bis 10 kg, die "2" für Gewichte zwischen 10 und 20 kg und die "3", wenn das Gewicht über 20 kg schwer ist. Die erweiterte OWAS-Methode, bei der zusätzlich noch die Stellung von Nacken und Kopf aufgenommen werden kann, wurde bei dieser Untersuchung nicht berücksichtigt, damit die Vergleichbarkeit mit anderen Forschungsarbeiten zu diesem Thema bestehen bleibt, zumal die Aufnahme der Kopfstellung eher selten ist.

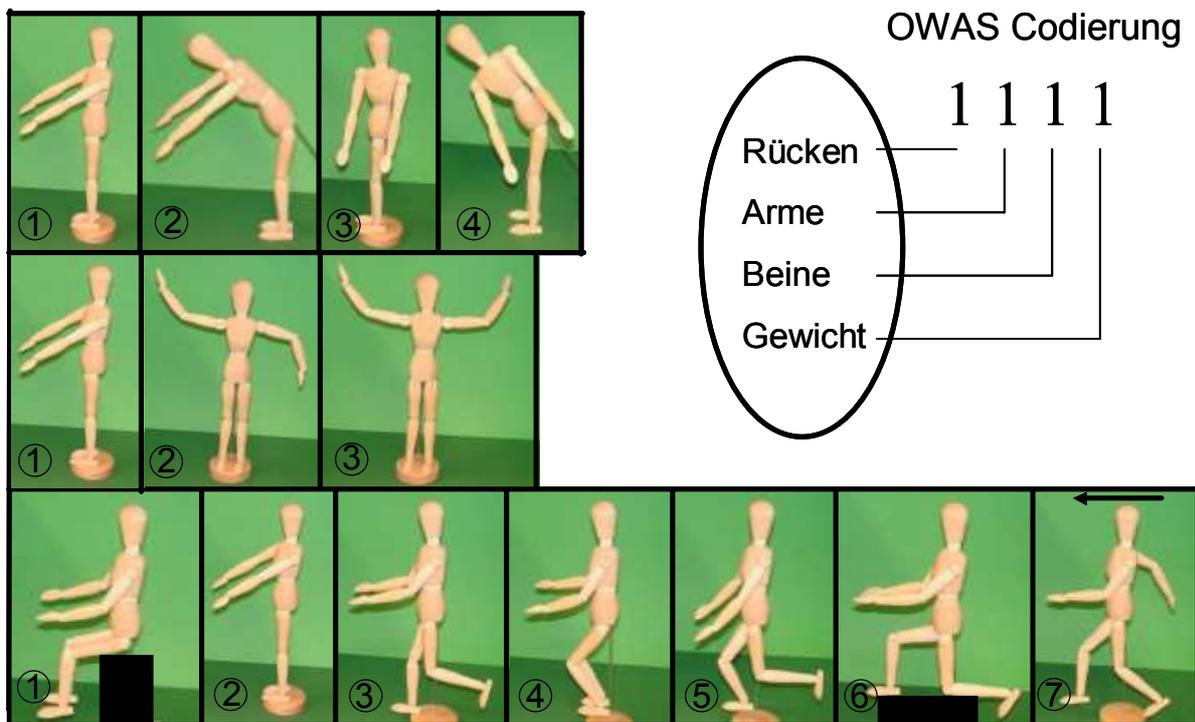


Abb. 10: Grundstellungen mit den dazugehörigen Ziffern für den Bewertungscode der Arbeitsschwereuntersuchung nach OWAS

Mit der zusätzlichen Einteilung in die drei Gewichtsklassen besteht nun der Code aus vier Ziffern für insgesamt 252 verschiedene Kombinationsmöglichkeiten. Jede untersuchte Körperhaltung mit ihrem vierstelligen Zifferncode wird nun einer so genannten "Maßnahmenklasse" zugeordnet. Folgende Maßnahmenklassen werden hierfür unterschieden [40]:

Maßnahmenklasse 1: Die Körperhaltung ist normal; Maßnahmen zur Arbeitsgestaltung sind nicht notwendig.

Maßnahmenklasse 2: Die Körperhaltung ist belastend; Maßnahmen, die zu einer besseren Arbeitshaltung führen, sind in nächster Zeit vorzunehmen.

Maßnahmenklasse 3: Die Körperhaltung ist deutlich belastend; Maßnahmen, die zu einer besseren Arbeitshaltung führen, müssen so schnell wie möglich vorgenommen werden.

Maßnahmenklasse 4: Die Körperhaltung ist deutlich schwer belastend; Maßnahmen, die zu einer besseren Arbeitshaltung führen, müssen unmittelbar getroffen werden.



Beispiel 1: Code 1111



Beispiel 2: Code 2151

Abb. 11: Beispiele für die Ziffernvergabe nach Körperhaltungen bei OWAS

Beispielsweise würde eine Körperhaltung, die mit dem Code 111 beschrieben ist (Abb. 11) und bei der eine Holzmasse von bis zu 10 kg hantiert wird und dadurch mit einer vierten Ziffer zum Code 1111 wird, nach der OWAS-Klassifizierung als Maßnahmenklasse 1 eingestuft werden. Im zweiten Beispiel in Abb. 11 wird aufgrund der Körperhaltung der arbeitenden Person der Zifferncode 2151 vergeben, entsprechend fällt diese Situation unter die Maßnahmenklasse 3. Eine tabellarische Grundlage für diese Einteilung wurde von Fachkräften für Arbeitszeitstudien, Physiologen und Medizinern in der finnischen Schwer- und Leichtindustrie auf Basis von Belastungskalkulationen erstellt [51].

Bei der OWAS-Methode werden die Arbeitshaltungen einer oder mehrerer Menschen nach dem Multimomentverfahren ermittelt [55]. Üblicherweise befindet sich der Aufnehmer bei dieser Methode unmittelbar neben dem Probanden und notiert die Arbeitshaltung des Probanden in bestimmten vorgegebenen Intervallen (meist 30 Sekunden). Von dieser Vorgehensweise wurde hier abgewichen, indem die Arbeitsabläufe in der vorliegenden Untersuchung mit Hilfe eines Camcorders (Panasonic, drei Megapixel Auflösung) aufgenommen und später ohne Zeitdruck oder subjektive Momentauswahl am Computer ausgewertet wurden. Im Abstand von exakt 30 Sekunden wurde hierzu jeweils ein Bild aus dem Videomaterial herausgefiltert; anschließend wurde dazu der OWAS-Code für die darauf abgebildete Körperhaltung mit Hilfe des Programms "WinOwas" [56] erstellt und über den ebenfalls hinterlegten Umwandelungsschlüssel automatisch einer Maßnahmenklasse zugeordnet (vgl. Abb. 12). Somit werden beispielsweise für eine zweistündige Teilstudie 240 Einzelbilder in die Bewertung einbezogen.

The screenshot shows the WinOWAS input mask interface. It is divided into five main sections: Back, Arms, Legs, Load, and Workphase. Each section contains a list of options with corresponding numbers. A 'Start Clock' button shows a timer at 30. There are 'Exit' and 'Accept' buttons. At the bottom, there is a numeric keypad, an 'Observations' counter at 0, and 'Take Back' and 'Repeat' buttons. A 'Previous' table is also visible.

Previous	
Back	
Arms	
Legs	
Load	
Workphase	

Abb. 12: Die WinOWAS-Eingabemaske zur Feststellung des OWAS Codes und zur automatischen Zuordnung zu einer Maßnahmeklasse

Aus einer solchen Vielzahl von Einzelbeobachtungen ergibt sich eine repräsentative Stichprobe, aus der sich die Häufigkeit jeder der o.g. Maßnahmenklassen zuordnen lässt, hieraus werden dann die prozentualen Anteile jeder der vier Klassen bestimmt. Diese prozentualen Anteile (MK 1 bis MK 4) werden nun zu einem Belastungsindex L (nach Lundqvist [42]) gemäß der nachfolgenden Gewichtungformel verrechnet.

$$L = (1 \times \text{MK } 1) + (2 \times \text{MK } 2) + (3 \times \text{MK } 3) + (4 \times \text{MK } 4)$$

Die theoretische Bandbreite für den Belastungsindex L reicht von 100 bis 400. Mit Hilfe dieses Indexes können unterschiedliche Arbeitsverfahren und einzelne Ablaufabschnitte, aber auch Tätigkeiten unterschiedlicher Branchen miteinander verglichen werden [40]. Der Belastungsindex kennzeichnet den gesamten Arbeitsablauf und stellt das eigentliche Ergebnis einer Arbeitsschwereuntersuchung dar.

Methodenvariation und Reproduzierbarkeit. Zur Bewertung der Zeitintervalle der Bildfolgen und zur Feststellung der Reproduzierbarkeit wurde das Momentaufnahmeintervall in ausgewählten Teilstudien variiert. Das geschah zum einen durch eine um 15 Sekunden zeitversetzte Auswertung bei ansonsten gleicher Anzahl Aufnahmen. Zum anderen wurden auch einzelne Teilstudien komplett in einem 15-Sekunden-Intervall ausgewertet, wodurch sich die Anzahl Bilder über den gleichen Zeitraum verdoppelte. Diese Vorgehensweise wurde bei den drei ausgewählten Untersuchungen zu den Arbeitsverfahren "Spalten mit der Axt", "Spalten mit dem Senkrechtpalter" und "Spalten mit dem kleinen Spaltautomaten" durchgeführt. Sie wurden nach den ersten Ergebnissen

ausgewählt, da sie das Spektrum von wenig belastender Arbeit (kleiner Spaltautomat) bis zu stärker belastender Arbeit (Spalten mit der Axt) vollständig abdecken.

Untersuchungsobjekte. Neun verschiedene Teilbereiche der Scheitholzbereitstellung (siehe Tab. 2) wurden mit 16 verschiedenen Probanden (Tab. 1) untersucht. Neben einigen Studenten waren die Probanden größtenteils kleingewerbliche Produzenten, deren Brennholz auch für den Verkauf bestimmt war. Die Vielfalt an persönlichen Voraussetzungen sowie die Qualifikationen der Probanden ist in Tab. 1 zusammengestellt. Die Probanden sind die Arbeiter aus den ebenfalls durchgeführten Einzelzeitstudien (vgl. Kapitel 4.1.3.2).

Tab. 1: *Voraussetzung und Qualifikation der eingesetzten Probanden*

Proband	Größe [cm]	Gewicht [kg]	Geschlecht	Alter	Qualifikation
A	180	77	m	30	Forstingenieur (FH)
B	176	86	m	43	Hilfsarbeiter
C	185	75	m	35	Elektriker
D	178	72	m	30	Zimmermann
E	174	81	m	60	Hilfsarbeiter
F	168	69	m	65	Landwirt
G	175	78	m	53	Landwirt
H	168	51	w	23	Studentin
I	169	80	m	35	Dipl. Forstwirt
J	165	73	m	24	Student
K	175	90	m	40	Forstarbeiter
L	183	90	m	35	Maschinenbautechniker
M	183	80	m	27	Agrartechniker
N	186	88	m	24	Student
O	181	90	m	28	Dipl. Forstwirt
P	178	88	m	24	Landwirt

Insgesamt wurden neun Arbeitsabläufe über 37,7 Stunden gefilmt, für die Auswertungen wurden daraus 4213 Einzelbilder herausgefiltert (siehe Tab. 2). Nicht alle Bilder waren für eine Auswertung geeignet, das trifft beispielsweise zu, wenn sich der Proband bei einer Aufnahme gerade aus dem Aufnahmebereich entfernt hatte. Für die Berechnung des Belastungsindex wurden ausschließlich eindeutig auswertbare Fotos verwendet, die nicht auswertbaren Bilder wurden ohne Ersatz vollständig verworfen.

Tab. 2: Anzahl der Aufnahmestunden und daraus resultierende Bilder der Untersuchung

Verfahren	Film [h]	Anzahl Bilder	Anzahl bewerteter Bilder
Holzernte	2,5	317	282
Großer Spalautomat	2,8	350	323
Kleiner Spalautomat	4,6	577	496
Waagrechtspalter	4,0	501	481
Senkrechtspalter	6,6	823	752
Kreissäge	2,0	248	241
Spalten mit der Axt	4,0	496	490
Bündelhilfe	3,2	400	386
Zubringen	4,0	501	364
<i>Summe</i>	<i>33,7</i>	<i>4213</i>	<i>3815</i>

4.3 Bestimmung des Energieverbrauchs bei der Scheitholzproduktion

Zur Abschätzung des Gesamtenergiebedarfs wurden direkte Energieverbrauchsmessungen an Maschinen für die Scheitholzaufbereitung durchgeführt. Sämtliche Messungen erfolgten in Kombination mit den Arbeitszeitstudien (vgl. Kapitel 4.1). So konnte über die dabei zugleich festgestellte Holzdurchsatzmenge und Versuchsdauer auch eine Bestimmung des spezifischen Energieverbrauchs – d. h. die auf eine Einheit Holz bezogene Energiemenge – erfolgen.

Die Energieverbrauchsmessungen erfolgten an Brennholzkreissägen, Motorkettensägen, Spaltern und Säge-Spaltmaschinen. Die Brennholzsägen wurden durchweg elektromotorisch betrieben. Bei den spaltenden Geräten sind zapfwellen- und elektromotorbetriebene Geräte zu unterscheiden. Zapfwellenbetriebene Geräte sind meist über die Dreipunktaufhängung an einen Schlepper montiert, so dass der Antrieb des Hydraulikmotors eines Spalters direkt über die Gelenkwelle des Schlepplers erfolgen kann. Dadurch ist ein beweglicher Einsatz auf der Hofstelle oder im Wald möglich. Bei elektrischen Antrieben besitzt der Spalter einen Elektromotor für den Antrieb der Hydraulikpumpe. Dadurch ist der Spaltbetrieb stets auf eine Stromquelle in der näheren Umgebung angewiesen. Elektrische Antriebe werden häufig auch für große kombinierte Säge-Spaltmaschinen verwendet. Eine Energieverbrauchsmessung an einer derartigen Maschine konnte jedoch in der vorliegenden Untersuchung wegen des hierfür erforderlichen Eingriffs in die Starkstromverkabelung nicht durchgeführt werden.

Bei schlepperbetriebenen Geräten wurde der Energieverbrauch durch Messung des Dieserverbrauchs bestimmt. Dazu wurde der Kraftstofftank vor Versuchsbeginn bis zum Rand vollgetankt. Nach Versuchsende wurde der Tank mit Hilfe eines 2-l-Messbehälters erneut wieder aufgefüllt und die verbrauchte Kraftstoffmenge festgestellt. Beim Betanken wurde auf einen ebenen Untergrund geachtet. Die Ablesegenauigkeit lag bei 100 ml. Als zapfwellenbetriebene Geräte wurden zwei große Senkrechtspalter, ein großer Waagrechtspalter und eine kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine untersucht. Zusätzlich wurden Messungen an Geräten mit aufgebauten Verbrennungsmotoren durchgeführt. Hierbei handelte es sich um eine große kombinierte Säge-Spaltmaschine.

Die Messung der Kettensäge erfolgte im Wald bei der Betankung auf einer ebenen Forststraße. Es wurde die benötigte Menge des Zweitaktgemisches und des Schmieröls gemessen.

Bei elektrisch angetriebenen Geräten wurde ein Stromverbrauchsmessgerät zwischen der Stromquelle und dem jeweiligen Gerät eingebaut. Hierbei handelte es sich um das Drei-Phasen-Messgerät TM 39 von ZES Zimmer Electronic Systems. Es wird mittels Standardsteckdosen (240 bzw. 400 V) angeschlossen und misst die Wirkenergie auf 1/100 kWh mit einer Genauigkeit von 0,5% [61]. Vor und nach der Holzbearbeitung wurde der jeweilige Zählerstand der Digitalanzeige abgelesen und anschließend der jeweiligen Benutzungsdauer sowie der produzierten Holzmenge zugeordnet.

4.4 Bestimmung von Raummaßen für Scheitholz

4.4.1 Untersuchte Raummaße

Da der Raummeter nicht von den SI-Basiseinheiten (Système International d'Unités) abgeleitet werden kann, sondern nur der Kubikmeter (m^3), herrscht Unklarheit darüber, wie der Raummeter (R_m) verwendet werden soll. Deswegen werden im Folgenden die unterschiedlichen hier untersuchten Einheiten definiert.

Festmeter (Fm) oder Kubikmeter (m^3). Der Festmeter ist ein forstlicher Begriff für den Kubikmeter und bezeichnet das Raummaß für Holz, beispielsweise für Langholz. Ein Festmeter entspricht folglich der Menge kompakten Holzes, gleich einem Würfel mit der Kantenlänge 1 m, den man aus einem Baumstamm sägen würde. Um eine Verwechslung mit dem Fermi ($1 \text{ fm} = 10^{15} \text{ m}$) zu unterbinden, sollte man den Festmeter mit einem großen F also Fm abkürzen.

Raummeter aus Meterscheitholz geschichtet (Ster). Der Raummeter (auch "Ster" genannt) entspricht dem Raummaß für meterlanges geschichtetes und gespaltenes Scheitholz, welches über eine Breite und Höhe von je einem Meter gemessen wird (Abb. 13). Er beinhaltet auch die Luftzwischenräume (Grafik B in Abb. 15). Bei diesem Maß handelt es sich häufig um das Standardmaß für den Brennholzverkauf.

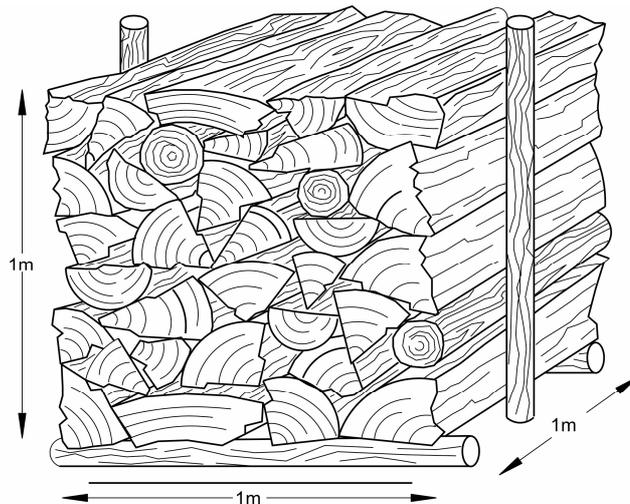


Abb. 13: Der Raummeter Brennholz (R_m) [18]

Raummeter (R_m) Rundlinge (ungespalten). Der Raummeter aus ungespaltenen "Rundlingen" (Grafik A in Abb. 15) wird in gleicher Weise gemessen, wie bei gespaltenen und geschichteten Meterholzscheiten. Auch hierbei zählt der Luftzwischenraum zum gemessenen Volumen dazu.

Meterscheitholz kreuzweise geschichtet. Bei diesem Raummaß wird das Meterscheitholz auf einer Grundfläche von einem Quadratmeter nebeneinander gelegt. Weitere solche Holzlagen werden abwechselnd um 90° versetzt aufeinander gestapelt (Abb. 14). Beim kreuzweise geschichteten Meterholz handelt es sich nicht um ein Verkaufsmaß, sondern um eine Lagerform, die oft zur Stabilisierung der Seiten verwendet wird.



Abb. 14: Der Raummeter aus Meterscheitholz, kreuzweise geschichtet

Raummeter aus geschichteten 33 cm Kurzscheiten. Dieses Raummaß umfasst das Volumen von drei hintereinander geschichteten Stapeln mit Scheitholz der Länge 33 cm auf einer Fläche von einem Quadratmeter und in einer Höhe von einem Meter (Grafik C in Abb. 15).

Schüttraummeter mit 33 cm Kurzscheiten. Hierbei handelt es sich um Holzscheite mit meist 33 cm Länge, die lose geschüttet werden (z. B. von einem Förderband in einen Behälter) und den Raum von einem Kubikmeter ausfüllen. In Abb. 15 sind hierzu zwei unterschiedliche Varianten dargestellt, der Schüttraummeter in der Gitterbox (Grafik D) und in einem glattwandigen Messrahmen (Grafik E).

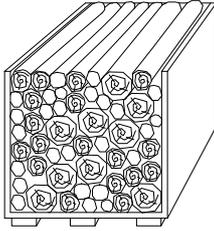
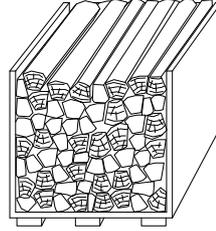
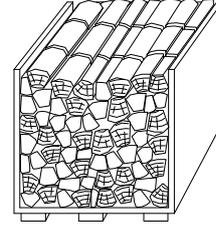
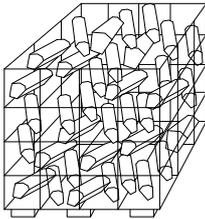
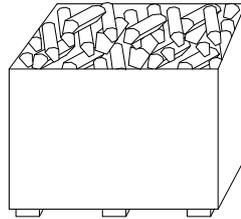
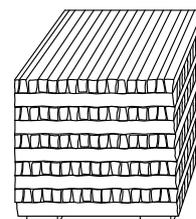
A Meterholz ungespalten ("Rundlinge"), gestapelt**B** Meterholz gespalten gestapelt**C** Scheitholz 33 cm gestapelt**D** Scheitholz 33 cm lose in Gitterbox**E** Scheitholz 33 cm lose in Kiste**F** Meterholz gespalten kreuzweise geschichtet

Abb. 15: In Stapel- und Schüttversuchen betrachtete Raummaße für Brennholz

4.4.2 Verwendete Messgeräte

Für die Bestimmung der Raumdichten von verkaufsfähigen Scheitholzsortimenten wurde ein spezieller Standard-Messrahmen für Stapel und Schüttgut-Scheite erstellt (Abb. 16). Damit konnte eine einheitliche Bestimmung repräsentativer und wiederholbarer Messwerte für die Raumdichte der in Kapitel 4.4.1 genannten Brennholzsortimente erfolgen. Der Messrahmen wird von einem Stahlgestänge stabilisiert, durch den Deformationen des Behälters infolge unterschiedlicher Scheitgewichte vermieden werden. Zur Verschalung wurden Betoplan-Platten angebracht, deren glatte Oberfläche ein Verkanten einzelner Scheite an der Außenwand verhindert. Die Vorder- und Hinterwand lässt sich bei Bedarf entfernen. Mit Ösen an den vier oberen Ecken lässt sich der gefüllte Rahmen über Stahlseile zur Bestimmung der Bruttomasse an einer Hängewaage aufhängen. Die Grundflächen-Innenmaße von 110 cm x 120 cm entsprechen weitgehend den Maßen eines üblichen Behältnisses für die Scheitholzbevorratung, es entspricht dem einer Gitterbox bestehend aus einer Euro-Palette, die umrandet mit Baustahlgewebe umfasst wurde. Die Höhe wurde mit 200 cm ebenfalls in Anlehnung an derartige Umschlagsbehälter gewählt; das Leergewicht betrug 203 kg. Um weitere Werte als Vergleich zu erhalten, wurden die geschütteten Werte zusätzlich noch in einer Gitterbox mit den Abmessungen 100 cm x 120 cm x 200 cm erhoben (zur Gitterbox vgl. Abb. 18), wobei es sich bei den Behälterwandungen um ein Baustahlgitter mit 15 x 15 cm Sprossenabstand handelte. Das Leergewicht dieser Gitterbox lag bei 50 kg.



Abb. 16: Der Messrahmen für die Bestimmung der Scheitholz Raummaße

Für die Bestimmung der Messoberkante im Füllbehälter wurde eine Wasserwaage eingesetzt. Die damit ermittelte Stapelhöhe wurde mit einem Maßband festgestellt. Die Holzmenge in Festmetern wurde an den Rundlingen durch eine Kreuzkluppung des Mittendurchmessers ermittelt. Eine Kluppe ist ein forstliches Messgerät zur Ermittlung eines Durchmessers von Rundholz. Die Ablesegenauigkeit beträgt dabei 1 cm, der Messwert wurde gemäß der allgemeinen forstüblichen Praxis abgerundet. Bei einer Kreuzkluppung erhält man den Mittendurchmesser als Mittelwert zweier um 90° verschobenen Messungen mit einer Kluppe. So können Messfehler bei ellipsenförmigen Rundlingen vermindert werden. Über die konstante Länge der Rundlinge (1 m) kann aus dem gemessenem Mittendurchmesser das Festmetervolumen errechnet werden.

4.4.3 Untersuchte Holzarten und Aufbereitungen

Untersucht wurde Brennholz der Baumarten Fichte (*Picea abies*) und Buche (*Fagus sylvatica*) in den Sortimenten:

- 1 m Rundlinge ungespalten
- 1 m gespaltene Scheite
- 0,33 m gespaltene Scheite

Für die Messungen im Versuch wurden je Baumart sechs Raummeter Holz beschafft; sie wurden zunächst als waldfresh geschnittene Rundlinge mit einem Durchmesser zwischen 7 und 20 cm in den Messrahmen eingeschichtet. Nach einer anschließenden sechsmonatigen abgedeckten Lage-

rung wurde das gleiche Holz im lufttrockenen Zustand (unter 20% Wassergehalt) erneut für eine Volumenbestimmung eingeschichtet. Im Durchschnitt lagen die Durchmesser bei der Fichte bei 11,7 cm und bei der Buche bei 12,2 cm. Der Anfangs- und Endwassergehalt wurde gemäß der in Kapitel 4.5.4.2 beschriebenen Methode festgestellt.

Der Anfangswassergehalt des waldfrischen Fichtenholzes lag bei 50%, während das frische Buchenholz mit 40% Wassergehalt etwas trockener war. Die abgelagerten Rundlinge wiesen – wie auch im Lagerungsversuch in Kapitel 5.4 bestätigt wird – einen für die Lagerdauer von sechs Monaten typischen Wassergehalt von 24 bzw. 28% auf, während die gespaltenen mit 17 bis 20% Wassergehalt (Tab. 3) schon als ofenfertig bezeichnet werden können. Aufgrund der relativ ungünstigen Trocknungsbedingungen (schattigen, windarme Lage am Gewässer) ist dieser Trocknungsfortschritt bei der Buche aber etwas geringer als in den eigentlichen Lagerungsversuchen (vgl. Kapitel 5.4).

Da ein Schwinden des Holzes nur bei Wassergehalten zwischen dem absolut trockenen Zustand (atro) und dem Fasersättigungspunkt stattfindet [41], ist davon auszugehen, dass sie bei den hier untersuchten Hölzern nur in untergeordneter Größenordnung eingetreten ist. Der Fasersättigungspunkt liegt bei zerstreutporigen Laubhölzern wie etwa der Buche bei 24 bis 26% Wassergehalt und bei Nadelhölzern ohne ausgeprägtem Farbkern, wie der Fichte, bei 23 bis 25% (Werte für den Wassergehalt berechnet aus den Angaben für die Holzfeuchte in [41] nach folgender Formel für den Wassergehalt aus [22]:

$$w = \frac{mw}{mb + mw} = \frac{u}{1 + u}$$

w Wassergehalt, u Holzfeuchte; mw Wassermasse; mb Trockenmasse)

Tab. 3: *Wassergehalte des für die Bestimmung der Raummaße verwendeten Holzes (Lagerung unter schattigen, windarmen Bedingungen am Gewässer)*

	Wassergehalt im Frühjahr (Mai)			Wassergehalt im Herbst (Oktober)		
	Rundlinge ungespalten	Meterscheite gespalten	33 cm gespalten	Rundlinge ungespalten	Meterscheite gespalten	33 cm gespalten
Buche	39,7%	39,7%	39,7%	28,4%	19,9%	16,8%
Fichte	50,8%	50,8%	50,8%	24,4%	18,4%	17,1%

4.4.4 Versuchsplan und Messdurchführung

Versuchsplan. Mit den in Kapitel 4.4.3 vorgestellten Holzarten und Aufbereitungsformen wurden sowohl im Frühjahr als auch im Herbst jeweils die sechs genannten Raummaße bestimmt (vgl. Kapitel 4.4.1), wobei insgesamt je Holzart zunächst nur Rundlinge (6 Chargen à 1 Rm) eingesetzt wurden. Diese Chargen wurden nach den Messungen als Rundholz zum Teil weiter aufgearbeitet (Spalten bzw. Sägen) und für weitere Raummaßbestimmungen erneut verwendet. Zu jeder der Versuchsvarianten bzw. Chargen wurde die Messung zweimal wiederholt (außer kreuzweise

Schichtung: einfache Messung), das heißt, dass jede Probe insgesamt dreimal in den Messrahmen oder in die Gitterbox eingestapelt bzw. eingeschüttet wurde, so dass insgesamt 238 Messungen durchgeführt wurden. Eine Übersicht über diese Messungen zeigt Tab. 4.

Die im Frühjahr und Herbst durchgeführten Wassergehaltsbestimmungen für die verwendeten Chargen erfolgte gemäß der in Kapitel 4.5.4.3 vorgestellten Methodik. Für die Probenentnahme aus den Scheiten wurde eine Kreissäge verwendet.

Tab. 4: *Versuchsplan für die Raummaßbestimmung der Buchen(Bu)- und Fichten(Fi)-proben (je Holzprobe drei Wiederholungen, außer kreuzweise Stapelung: 1 Messwert) sowie Schritte der Messdurchführung*

Zeitpunkt	Sortiment	Holzproben												Schritt
		Bu1	Fi1	Bu2	Fi2	Bu3	Fi3	Bu4	Fi4	Bu5	Fi5	Bu6	Fi6	
Frühjahr	Rundlinge	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	1
	Meterscheite gespalten					X	X	X	X	X	X	X	X	2
	Meterscheite kreuzweise					X	X	X	X					3
	33 cm Scheite geschichtet									X	X	X	X	4
	33 cm Scheite geschüttet im Messrahmen									X	X	X	X	5
	33 cm Scheite geschüttet in der Gitterbox									X	X	X	X	6
Herbst	Rundlinge	X	X	X	X									7
	Meterscheite gespalten	X	X	X	X	X	X	X	X					8
	Meterscheite kreuzweise	X	X	X	X	X	X	X	X					9
	33 cm Scheite geschichtet	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	10
	33 cm Scheite geschüttet im Messrahmen	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	11
	33 cm Scheite geschüttet in der Gitterbox	X	X	X	X			X	X	X	X	X	X	12

Die Messdurchführung. Zu Beginn wurden die verwendeten Chargen als Rundlinge zu Raummeterbündeln zusammengefasst und gewogen (vgl. Kapitel 4.4.2). Die Versuchsvarianten bzw. Chargen wurden in der Messabfolge untersucht, wie sie in Tab. 4 als "Schritte" zusammengestellt ist. Zunächst wurden die ungespaltenen Buchen- und Fichtenmeterstücke (insgesamt 12 Raummeter) in den Messrahmen geschichtet (Schritt 1). Dazu blieb die hintere Wand geschlossen, damit das Holz hinten gleichmäßig an der Wand anlag. Die Rundlinge wurden oben horizontal verteilt, so dass sich eine weitgehend waagerechte Fülllinie ergab. Zur Füllhöhenbestimmung wurde nun eine Messlatte im obersten Punkt mit der Wasserwaage horizontal ausgerichtet. An der Unterkante der Messlatte wurde schließlich mit einem Maßband oder Zollstock die Füllhöhe abgelesen (Abb. 17). Ungefüllte Zwischenräume zählen dabei wie auch an den Seitenflächen zum gemessenen Volumen.

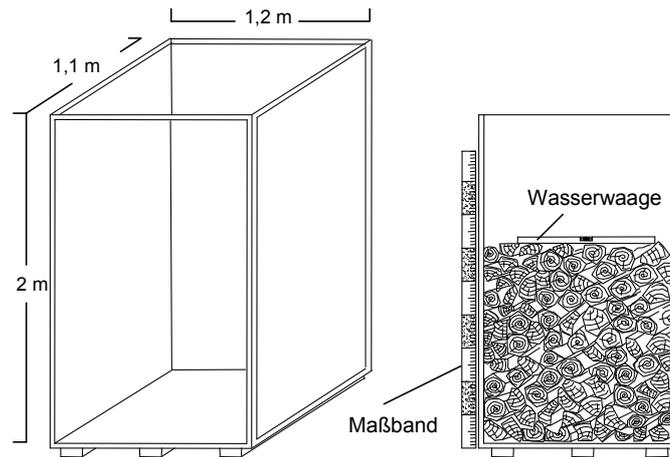


Abb. 17: Höhenmessung für die Volumenbestimmung im Standard-Messrahmen

Die für die Volumenbestimmung erforderliche Breite war durch die Rahmenbreite vorgegeben. Bei der Länge des Stapels wurde ohne weitere Messung von einem Meter Holzlänge ausgegangen (Meterscheite). Nach der Füllhöhenbestimmung wurde das Holz komplett aus dem Messrahmen entfernt und der Rahmen wurde erneut befüllt und gemessen. Dies wurde wiederholt, bis zu jeder Charge insgesamt drei Messungen vorlagen. Ein Teil der Rundlinge (2 Rm je Holzart) wurde anschließend gebündelt und im Freien abgedeckt über ca. sechs Monate bis zum Herbst gelagert. Zuvor waren sämtliche Holzstücke gezählt und mit einer je nach Sortiment einheitlichen Farbe markiert worden, um eine lückenlose Durchführung aller Messungen mit immer demselben Holz, d. h. mit dem einheitlichen Ausgangsvolumen eines Raummeters (Rundlinge), zu gewährleisten. Die durchgeführte Überprüfung zeigte, dass es zwischenzeitlich nicht zum Verlust oder Diebstahl von einzelnen Holzstücken gekommen war.

Eine Gewichtsbestimmung war nicht erforderlich, da sie für die hier angestrebte Feststellung von Umrechnungsfaktoren unerheblich ist. Aufgrund des erfassten Gesamtgewichts der Raummeterbündel und der Wassergehalte vor und nach der Lagerung war aber eine Berechnung der tatsächlichen Raumgewichte für die hier verwendeten Holzarten und Probenherkünfte möglich (vgl. Kapitel 5.7).

Die nach Abzug der je Holzart eingelagerten Rundlinge (4 Rm) verbliebene Holzmenge (8 Rm) wurde unmittelbar anschließend zu Meterscheitholz gespalten und danach wie beschrieben für die erneute Stapelung und Bestimmung im Messrahmen verwendet (Schritt 2 in Tab. 4). Es handelte sich also um dasselbe Holz (in exakt derselben Menge), das schon bei den Rundlingstapelversuchen verwendet worden war, allerdings wurden nun weniger Chargen eingesetzt.

Für die weiteren Messungen wurden die gespaltenen Meterscheite im dritten Schritt kreuzweise geschichtet (vgl. Kapitel 4.4.1). Diese Art des Stapelns wird oft am Rande eines Holzstoßes eingesetzt, da sie eine erhöhte Seitenstabilität bietet, die ein Auseinanderfallen der Scheite verhindert. Hierzu wurde der Messrahmen nicht verwendet, die Stapelung fand auf einer einfachen Grundfläche statt und die Höhe wurde wie oben beschrieben festgestellt. Für die Volumenberechnung wurde eine Grundfläche von 1 x 1 m verwendet. Im Gegensatz zu den übrigen Messungen wurden diese Versuche nicht wiederholt.

Nach den Messungen wurde die Charge mit gespaltenen Meterscheiten erneut geteilt; zwei der vier Raummeter wurden bis zum Herbst gelagert und die übrigen 2 Rm je Baumart wurden zu 33 cm Scheiten gesägt. Diese Scheite wurden nun für die übrigen Volumenmessungen verwendet (Schritt 4, 5 und 6).

Für das Raummaß der geschichteten 33-er Scheite wurde der Messrahmen ohne Stoßfuge in drei Reihen hintereinander aufgefüllt, wobei die Scheite an der hinteren Wand des Messrahmens anlagen. Bei der Füllhöhenbestimmung wurde wie beim Meterholz vorgegangen. Die Stapelbreite war durch die Rahmenbreite vorgegeben und bei der Länge des Stapels im Messrahmen wurde ohne weitere Messung von einer auf einen Meter aufaddierten Stapellänge ausgegangen, d. h. es wurde unterstellt, dass jeweils drei 33-er Scheite hintereinander liegend eine Länge von einheitlich einem Meter einnehmen.

Im fünften Schritt wurde dann der Messrahmen an den Seiten komplett geschlossen und die 33-er Scheite wurden über ein Förderband aus konstant 2,5 m Höhe in den Messrahmen abgeworfen (Abb. 18). Die Messung der Füllhöhe dieser lose geschütteten Scheite erfolgte nachdem die Scheite noch horizontal verteilt wurden. Der sechste Schritt bestand dann in der Bestimmung der Schüttraummaße mit einer Baustahl-Gitterbox wie in Abb. 18 gezeigt (vgl. Kapitel 4.4.2).



Abb. 18: Befüllen der Gitterbox für die Schüttevolumenbestimmung

Die Schritte sieben bis zwölf wurden analog zu den Messungen der Schritt 1 bis 6 durchgeführt. Dies erfolgte nach der 6-monatigen Lagerung von Mai bis Oktober; dadurch sollte eventuellen

Veränderungen durch die Lagerung Rechnung getragen werden. Sämtliche gelagerten Partien wurden auch hier zuvor gewogen. Durch die Bündelung und farbliche Markierung der Meterhölzer war sichergestellt, dass exakt dieselbe Chargengröße der Frühjahrmessung auch für die Herbstmessung verwendet wurde, so dass keine Vermischung der Chargen stattfand und eine Gegenüberstellung der Messtermine (Wassergehalte) möglich war. Außerdem konnte ein Materialverlust, der die Ergebnisse verfälscht hätte, somit ausgeschlossen werden.

Die zunehmende Vielzahl von im Herbst für jeden Messschritt untersuchten Chargen (Tab. 3) ist auf die Tatsache zurückzuführen, dass die gelagerten Rundhölzer aber auch die gespaltenen Meterscheite nach der Bestimmung im Standard-Messrahmen noch zum Teil mehrfach aufbereitet wurden (Spalten bzw. Sägen), um damit weitere Messvarianten bei ansonsten gleichbleibenden Holzeigenschaften (Rohdichte, Wassergehalt, Ausgangsdurchmesser) zu ermöglichen.

4.5 Bestimmung der Lagerungsverluste und der Wassergehaltsänderungen

4.5.1 Verwendete Holzarten und Sortimente

Die drei Holzarten, die in Deutschland den größten Anteil an der Baumartenzusammensetzung haben [30] wurden untersucht:

- Fichte (*Picea abies*),
- Buche (*Fagus sylvatica*) und
- Kiefer (*Pinus sylvestris*),

d.h. zweimal Nadelholz (Fi, Kie) und einmal Laubholz (Bu). Bei der Wahl der Holzchargen für die Versuche wurde auf frisches, homogenes und gesundes Material geachtet. Das Holz für den Lagerstandort Freising stammte aus Durchforstungen der Wälder um Freising und für den Standort Allgäu aus der Umgebung von Kempten.

Drei verschiedene Sortimente wurden unterschieden:

- ungespalten (1-Meter-Scheite, Fichte und Buche),
- gespalten (1-Meter-Scheite, Fichte, Buche und Kiefer),
- gespalten (33 cm Scheite, Fichte und Buche)

4.5.2 Lagergestaltung

Mit einer Vorrichtung (Abb. 19) wurden runde Bündel aus Scheitholz mit einem Volumen von jeweils 0,5 Raummeter erstellt. Dafür wurden die Scheite in die rundgeformte Bügelhilfe gelegt. Ist diese gefüllt, kann man das Bündel mit Hilfe eines Spanngurtes zusammenzurren. Dann folgt das Verschnüren mit einem UV-Licht-beständigen Garn links und rechts der Haltebügel. Nach dem Verschnüren werden die Bügel am Verschluss oben geöffnet, so dass diese nun aus zwei Halbbügeln bestehen. Eine Hälfte wird aus der Halterung gehoben und zur Seite gelegt. An den verbleibenden halben Bügeln wird nun die Vorrichtung von Hand zur Seite gekippt, so dass das verschnürte Rundbündel aus der Vorrichtung herausgerollt werden kann.

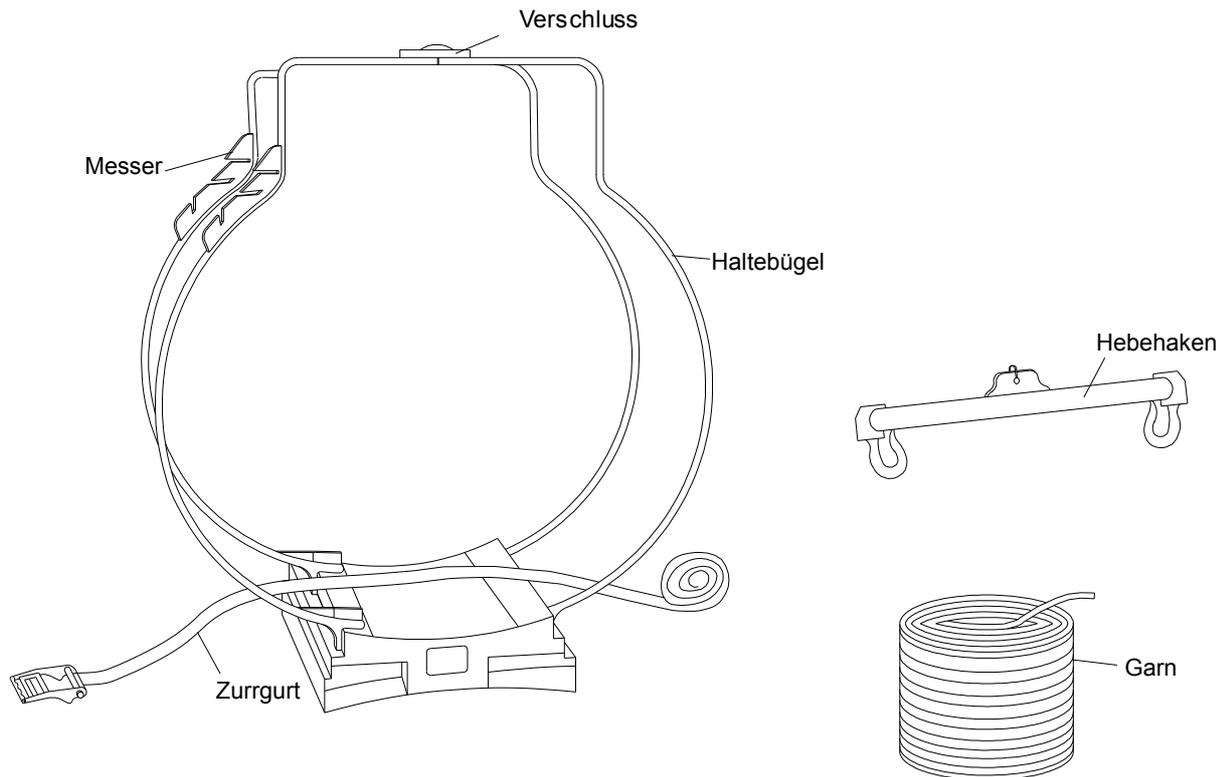


Abb. 19: Bündelhilfe entweder für 0,5 Rm oder 1 Rm Scheitholz

Für den Lagerversuch wurde nun zusätzlich in der Mitte zwischen den seitlichen Garnwicklungen ein aus vierfach umwickeltem Garn bestehender Tragegurt gebildet, der ausschließlich dazu diente, die Bündel zum Wiegen aufzuhängen, ohne dass dies an den beiden äußeren Garnwickeln geschehen musste. Von den äußeren Garnwickeln wurde das Bündel somit ausschließlich zusammengehalten, wodurch eine besonders feste Verpackung mit nur geringer Reibung der Scheite untereinander erreicht wurde. Dies war erforderlich, um ein Abschaben des Holzes bei den wiederholten Gewichtsbestimmungen der Bündel zu vermeiden und somit vermeintliche Trockenmasseverluste zu reduzieren. Wurden diese Haltegarnstränge auf Grund von Schrumpfung des trocknenden Holzes zu locker, konnte ein Nachspannen erfolgen.

Die Rundbündel wurden schließlich in drei Lagen übereinander gestapelt, so dass ein Holzstoß jeweils ca. zwei Meter Höhe und ca. sechs Meter Länge aufwies (Abb. 20). Zusätzlich wurden 33 cm lange Scheite in Gitterboxen geschüttet aufbewahrt. Die Lagerung fand zum einen im Freien, und zum andern unter Dach in einer Maschinenhalle statt, die nach einer Seite hin offen und auf der anderen Seite nicht vollständig mit Holzplanken bis zum Boden hin verkleidet worden war, so dass über einen freien Spalt von ca. 30 cm Höhe ein ausreichender Luftzutritt sicher gestellt war.

Einer der beiden im Freien errichteten Holzstöbe wurde mit einer 1,5 m breiten LKW-Plane abgedeckt, welche oben mit einzelnen Scheiten beschwert wurde. Ein anderer Holzstoß war nicht abgedeckt und so der Witterung ungeschützt ausgesetzt. Die Gitterboxen lagerten ausschließlich im Freien nebeneinander, einmal abgedeckt und einmal nicht abgedeckt. Alle Holzstöbe lagerten auf Rundholzstangen um einen Nässeschutz nach unten zu bieten und eine gute Luftzirkulation zu

gewährleisten. Darunter war eine 1,5 m breite LKW-Plane ausgelegt worden. An der Seite wurden die Holzstöße durch ein Holzgestänge gestützt. Die zwischen den runden Bündeln gebildeten Zwischenräume wurden mit einzelnen Scheiten gefüllt, um einen homogenen Holzstoß zu erhalten. Weiter wurden einzelne Scheite neben den Holzstößen gelagert, um Probenmaterial für Untersuchungen zur Wassergehaltsverteilung innerhalb der Scheite zurückzubehalten.

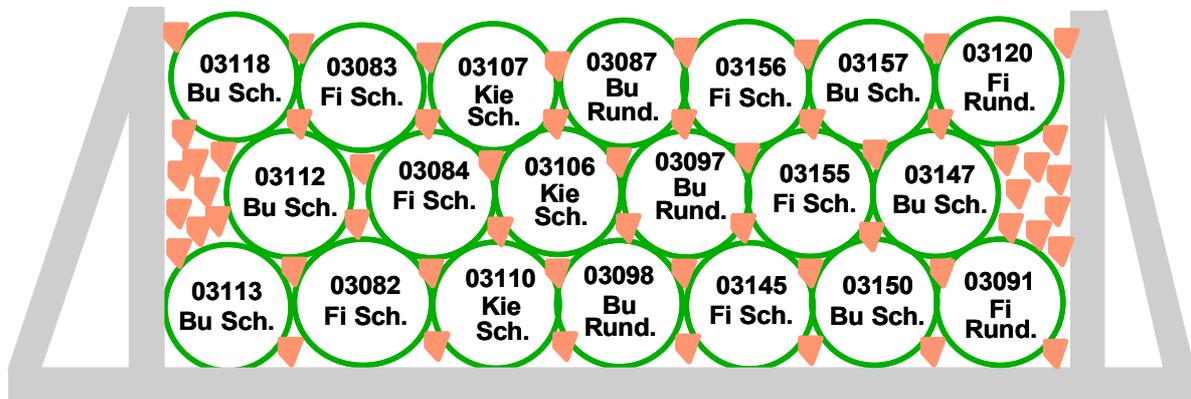


Abb. 20: Ein Beispiel einer Lageranordnung der Meterscheitholzbindel am Standort Freising: hier nicht abgedeckte Lagerung außen

4.5.3 Lagerstandorte und Versuchsdurchführung

Die beiden Versuchsstandorte waren leicht erreichbar und repräsentierten unterschiedliche klimatische Verhältnisse in Bayern (zu den gemessenen Klimadaten vgl. Kapitel 5.4). Ein Lager wurde auf dem Versuchsgut Dürnast nahe Freising errichtet (Hauptversuch); als Zusatzstandort wurde der Biomassehof Allgäu in Kempten gewählt. Am Lagerort waren ein Radlader bzw. ein Gabelstapler verfügbar, sie wurden bei der wiederholten Gewichtsbestimmung für das Anheben der Bündel an einer Wiegezone verwendet. Jedes Bündel wurde mit einer Nummer markiert und war damit eindeutig gekennzeichnet. Eine Übersicht über die an den beiden Standorten eingelagerten Versuchsbrennstoffe zeigt Tab. 5.

Tab. 5: Übersicht über die im Lagerversuch eingesetzten Holzarten und Sortimente

Holzart	Sortiment	Hauptstandort Freising			Zusatzstandort Kempten	
		Außen, unabgedeckt	Außen, abgedeckt	im Gebäude	Außen, unabgedeckt	Außen abgedeckt
Fichte	1-m-ungespalten	X	X	X		
	1-m-gespalten	X	X	X	X	X
	33-cm gespalten	X	X			
Buche	1-m-ungespalten	X	X	X		
	1-m-gespalten	X	X	X	X	X
	33-cm gespalten	X	X			
Kiefer	1-m-ungespalten					
	1-m-gespalten	X	X			
	33-cm gespalten					

Aufgrund der Erweiterung des Versuchs nach einem Jahr und der unterschiedlichen Sortimente und Lagerarten wurden am Hauptversuchsstandort Freising insgesamt 54 Meterholz-Bündel (23 Fichte, 25 Buche, 6 Kiefer) à 0,5 Rm benötigt und am Nebenversuchsstandort Kempten 16 Bündel à 0,5 Rm (8 Fichte, 8 Buche). Zusätzlich lagerten in Freising vier Gitterboxen mit 33 cm Scheiten geschüttet, die aus vier 0,5 Rm Bündel (2 Fichte, 2 Buche) hervorgingen.

Durchführung. Die Einlagerung (Versuchsbeginn) fand am Hauptstandort Freising im Dezember 2002 statt. Im darauffolgenden Februar wurde dann der zweite Versuchstandort in Kempten errichtet. Die Erweiterung für eine zweite Messperiode begann an beiden Standorten im November 2003. Für beide Versuchsstandorte und für beide Lagerungsperioden war der Endpunkt der Lagerung im November 2004 erreicht. Dabei konnte vor Ort auf geeignete Fahrzeuge mit Hebeeinrichtung (Frontlader, Gabelstapler) zurückgegriffen werden. Auch in anderen technischen und organisatorischen Belangen wurde die Versuchsdurchführung von den Betriebsleitern des Versuchsgutes Dürnast bzw. vom Biomassehof Allgäu wirkungsvoll unterstützt.

4.5.4 Probenahme und Messmethodik

Die im Lagerungsversuch betrachteten Fragestellungen waren im Wesentlichen durch Gewichts- und Massenbestimmung an den Holzsortimenten zu bearbeiten. Hierbei handelt es sich jedoch nur scheinbar um eine leicht lösbare messverfahrenstechnische Aufgabe. Aufgrund der großen Gesamtmassen und der Grobstückigkeit des Probenmaterials konnte bei der Probennahme und bei den eingesetzten Messverfahren nicht auf Standardverfahren und -verfahren zurückgegriffen werden. Insbesondere zu Fragen der Repräsentativität der Probennahme und der erforderlichen Trocknungsdauer bei der Wassergehaltsbestimmung lagen für Scheitholz bislang noch keine relevanten Erfahrungen vor. Daher mussten hierzu einige umfangreiche Vorversuche durchgeführt werden, welche die Basis für die Messdurchführung bzw. für die Datenauswertung liefern sollten.

4.5.4.1 Erforderliche Trocknungsdauer (Vorversuch)

Bei der hier vorliegenden Versuchsfrage kam es auf eine möglichst genaue und zuverlässige Bestimmung der Anfangs- und Endwassergehalte der eingelagerten Holzsortimente an. Daher musste zunächst die bei Holzscheiten erforderliche Mindesttrocknungsdauer ermittelt werden.

In einem entsprechenden Vorversuch wurden frische Buchenholzproben aus Holzscheiten entnommen. Bei diesen Proben handelte es sich um etwa vier bis fünf Zentimeter breite Stücke mit einem Gewicht von jeweils ca. 200 bis 400 g. Sie wurden gemäß prCEN/TS 14 [17] auf flachen Aluminiumschalen bei 105°C im Trockenschrank getrocknet, wobei die Proben in regelmäßigen Zeitabständen gewogen wurden. Die Ergebnisse in Abb. 21 zeigen, dass die größten Proben über ca. 40 Stunden im Trockenschrank bei 105°C verweilen müssen, bis keine Gewichtsveränderung mehr eintritt und die Proben somit als absolut trocken gelten konnten. Mit dieser Kenntnis wurde die Trocknungszeit für sämtliche Proben auf 48 Stunden festgelegt.

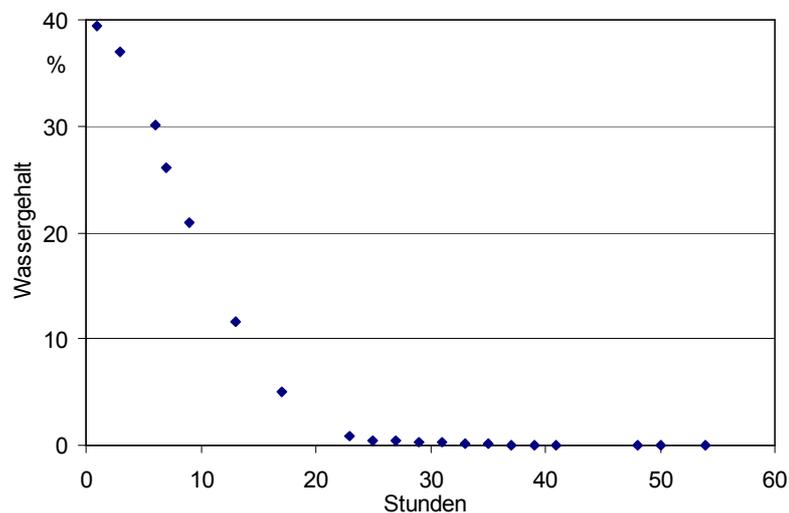


Abb. 21: Verlauf des Wassergehalts einer Buchenholzprobe im Trockenschrank bei 105 °C

4.5.4.2 Probenahme zur Wassergehaltsbestimmung (Vorversuch)

Aufgrund der großen Zahl der erforderlichen Wassergehaltsproben, die aus den einzelnen Scheiten zu entnehmen waren, war der Einsatz einer Handsäge wegen des unverhältnismäßig großen Zeitbedarfs nicht möglich. Daher musste in einem Vorversuch untersucht werden, ob die Verwendung einer Kreissäge oder einer Motorsäge das Messergebnis für die Bestimmung des Wassergehalts beeinflussen kann.

Als Ausgangsmaterial für die Überprüfung wurde Scheitholz mit einem Meter Länge als Rundling und als gespaltener Scheit ausgewählt. Es handelte sich um eine waldfrische Probe, die gesägt und gespalten wurde, wobei darauf geachtet wurde, dass es sich um astfreies Material handelte, um Wassergehaltsschwankungen im Holz gering zu halten. Es wurden Proben von Fichte (*Picea abies*) und Esche (*Fraxinus excelsior*) untersucht. Dabei wurde wie folgt vorgegangen.

Mit jedem Sägentyp (Bügelsäge, Motorsäge, Kreissäge) wurde eine drei bis vier Zentimeter dicke Scheibe (Prüfling) abgesägt. Dies geschah immer abwechselnd, wobei zwischen den einzelnen Proben ein dünner ca. ein bis zwei Zentimeter breiter Streifen verblieb, damit jeder Prüfling zwei Schnittflächen vom gleichen Sägentyp erhielt (Abb. 22). Insgesamt wurden so 92 Proben gewonnen, die sofort nach dem Trennschnitt in luftdichte Kunststoffbeutel verpackt wurden, bevor sie gewogen wurden.

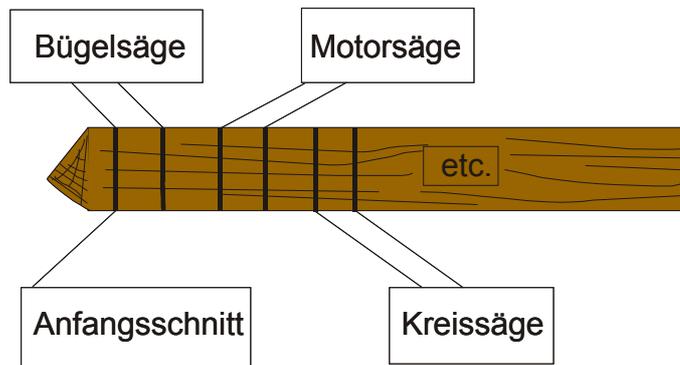


Abb. 22: Schnittfolge für die Probenahme

Anschließend wurde der Wassergehalt im Trockenschrank bei 105 °C bestimmt. Bei der Bestimmung des Einflusses der unterschiedlichen Sägen auf die Probennahme wurde eine maximal Abweichung der einzelnen gemessenen Wassergehalte von 2%-Punkten festgestellt. Nimmt man von sämtlichen Proben der unterschiedlichen Sägen den Mittelwert, so ergibt sich bei allen exakt der gleiche Wassergehalt. Hier war erwartet worden, dass der Einsatz der Bügelsäge zu weniger Wasserverdunstung führen würde, da hierbei die geringste Reibungswärme entsteht. Aufgrund der vorliegenden Daten ist diese Schlussfolgerung jedoch nicht zu treffen, zumal die Reibungswärme bei der elektrischen oder motormechanischen Säge insbesondere auf die abgetrennten Sägespäne wirkt, welche nicht der Probe zugeordnet bleiben. Folglich kann die Wahl der Säge vorrangig nach Gesichtspunkten der Arbeitserleichterung erfolgen, daher kam für die Holzproben hier die Motorsäge sowie die Kreissäge (Abb. 23) zum Einsatz.



Abb. 23: Probenahme mit Kreissäge für Wassergehaltsbestimmung

4.5.4.3 Wassergehaltsbestimmung im einzelnen Scheit (Vorversuche)

Zur Bestimmung des Wassergehalts eines einzelnen Scheits beliebigen Wassergehalts wurden drei jeweils vier Zentimeter dicke Proben bei den Baumarten Fichte und Buche an den Stellen 0 cm, 50 cm und 90 cm genommen (Abb. 24). Um festzustellen, mit welcher Gewichtung jede einzelne der drei Probenahmepositionen bei der Mittelwertbildung für den gesamten Scheit eingehen sollte, wurden weitere Vorversuche durchgeführt. Dazu wurden 30 Scheite mit unterschiedlichen Wassergehalten komplett in 25 ca. 4 cm dicke Scheiben gesägt und deren Wassergehalt nach der Trockenschrankmethode bestimmt. Aus diesen Einzelwerten ließ sich jeweils der durchschnittliche Gesamtwassergehalt jedes Scheites errechnen. Nun wurde dieser Durchschnittswert aller Scheiben jeweils mit dem Durchschnittswert verglichen, der sich aus den Wassergehalten der drei in Abb. 24 dargestellten Probenahmepositionen errechnete. In einer weiteren Anpassung wurde nun bestimmt, mit welchen Gewichtungsfaktoren die drei genannten Teilproben bei der Mittelwertbildung verrechnet werden müssten, damit die Mittelwerte am besten übereinstimmten. Diese Berechnungen erfolgen mittels einer computergestützten Funktion für einen polynomialen Fit. Die gefundenen Gewichtungsfaktoren sind:

- für Position 0 cm: 0,092,
- für Position 50 cm: 0,136,
- für Position 90 cm: 0,773

daraus ergibt sich die nachfolgende Formel für die Berechnung des Wassergehalts eines Scheites aus den drei Teilproben:

$$w_{\text{ges}} = 0,092 w_{0\text{cm}} + 0,136 w_{50\text{cm}} + 0,773 w_{90\text{cm}}$$

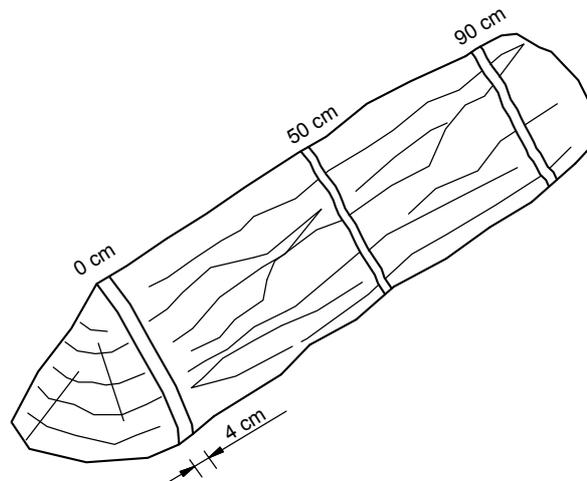


Abb. 24: Probenahmepositionen für die Wassergehaltsbestimmung am Meterscheit

An diesen Gewichtungsfaktoren fällt auf, dass die Position bei 90 cm sehr hoch gewichtet wird, während die beiden übrigen Messwerte einen geringen Einfluss bei der Mittelwertbildung ausüben. Diese Beobachtung legt die Vermutung nahe, dass sich eine Position im Meterscheit finden lässt, bei welcher der Wassergehalt in der Scheitholzpraxis generell am zuverlässigsten gemessen werden kann. Anhand der Vielzahl der durchgeführten Holzscheibenversuche lässt sich eine solche optimale Probenahmeposition nur für einen gewissen Bereich erhöhter Wahrscheinlichkeit für den richtigen Wert bestimmen. Dieser ergibt sich aus den Schnittpunkten des Gesamtdurchschnitts mit dem Wassergehaltsverlauf über die Gesamtlänge des Meterscheites (Abb. 25). Dieser Verlauf ähnelt oft einer quadratischen Funktion, er kann aber in den Extremzuständen (z. B. waldfrisch oder lufttrocken) auch annähernd eine Gerade ergeben.

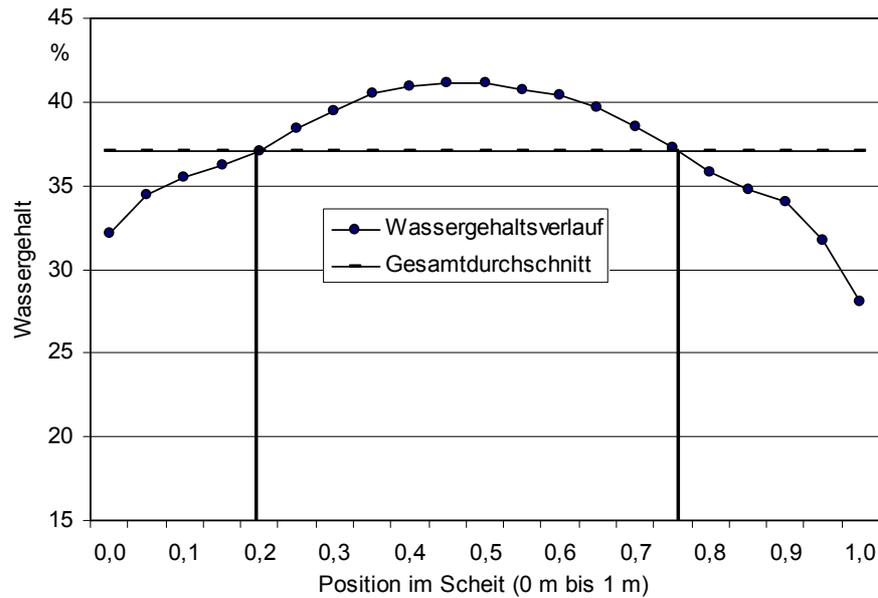


Abb. 25: *Optimale Position für eine einzelne Probenahme zur Wassergehaltsbestimmung in einem Buchen-Meterscheit*

In dem in Abb. 25 dargestellten Beispiel für ein Buchenscheit lagen die optimalen Probenahme-positionen für die Wassergehaltsbestimmung bei 0,24 m bzw. 0,77 m, hier stimmte der Gesamtdurchschnittswassergehalt mit dem Wassergehaltsverlauf im Scheit überein. Eine entsprechende Auswertung für die übrigen 41 in gleicher Weise gemessenen Meterscheite zeigt Abb. 26. Von der Gesamtzahl der gemessenen Wassergehalte der Probenscheiben sind in dieser Abbildung nur jene dargestellt, die mit dem Gesamtmittelwert übereinstimmen. Die exakten Werte werden durch Interpolieren der gemessenen Werte ermittelt. Die Ergebnisse in Abb. 26 zeigen, dass eine einzelne Wassergehaltsprobennahme im Bereich um ca. 15 cm (ab der Schnittkante gemessen) eine relativ hohe Aussagefähigkeit für den mittleren Wassergehalt des gesamten Meterscheites bietet. Wenn also nur eine einzige Probe aus einem Scheit genommen werden soll, bietet der Bereich von 11 cm – 20 cm die geringste Fehlerwahrscheinlichkeit. Auch für den Einsatz von Schnellbestimmungsgeräten (z.B. nach dem Leitfähigkeitsprinzip arbeitende Geräte [23]) ist hier ein geeigneter Einstechpunkt für die dabei verwendeten Ramm-Elektroden gegeben. Für eine genauere Messung jedoch bedarf es mehrerer Messstellen mit der richtigen Gewichtung.

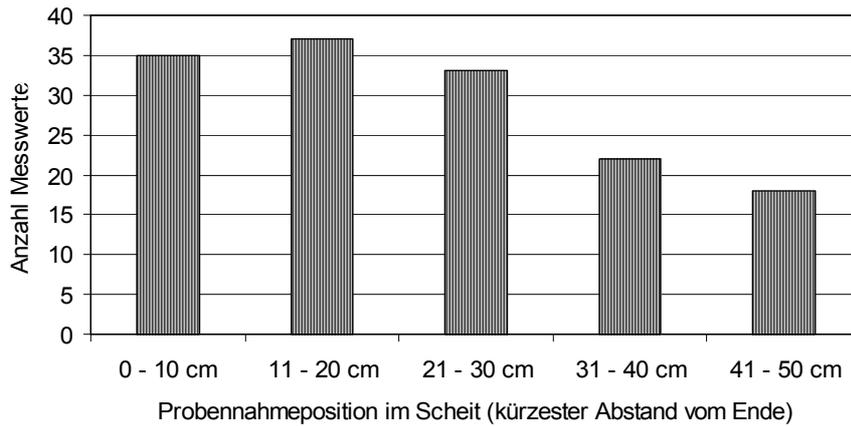


Abb. 26: Verteilung der Häufigkeit, mit der die optimale Probennahmeposition bei der Wassergehaltsbestimmung in einem bestimmten Abschnitt eines Meterscheits lag (Bereiche in denen die gemessene Wassergehaltsprobe mit dem Gesamtdurchschnitt übereinstimmte).

4.5.4.4 Die wiederkehrende Gewichtsbestimmung

Über die gesamte Lagerdauer wurden die durch Abtrocknung, Wiederbefeuchtung oder Trockenmasseverlust eintretenden Gewichtsänderungen in monatlichem Abstand erfasst. Hierzu wurden die einzelnen nummerierten Bündel bzw. Gitterboxen an einer Wiegezeile aufgehängt und gewogen (Abb. 28). Dazu wurde eine Flinterc DMS Wägezelle, Typ UB6 C3, mit einer Nennlast von 510 kg verwendet. Diese Version entspricht der Eichklasse III bis 3000d Auflösung [18]. Als Anzeigegerät war der DMS-Messverstärker HBM MVD 2510 angeschlossen. Die Ablesegenauigkeit betrug 50 g.

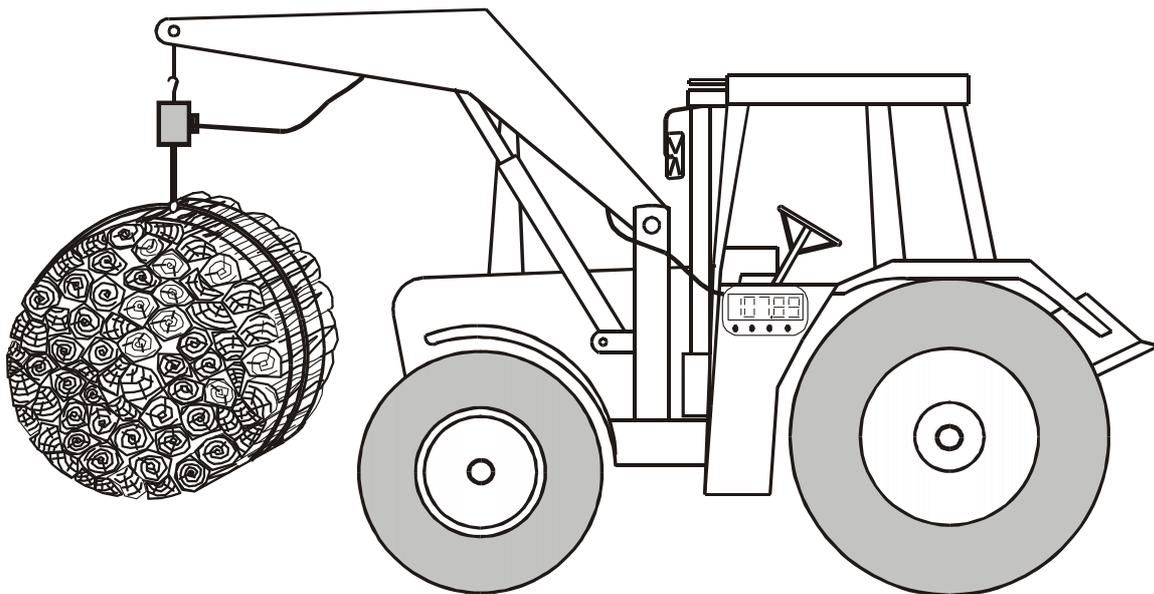


Abb. 27: Die regelmäßige Wiegung der Meterscheit-Bündel (schematisch)

Vor jedem Messen wurde die Wiegezone mit einer exakten Last von 280 kg kalibriert. Dieses Vorgehen ermöglichte es, einen Wettereinfluss oder eine Messdrift zu erkennen und gegebenenfalls zu korrigieren. Infolge der großen Empfindlichkeit kam es darauf an, nicht bei größerer Windbewegung zu wiegen, denn dies konnte das Ergebnis verfälschen.

Des Weiteren wurden mit Dataloggern (175-H2 der Firma Testo) innen und außen am Lagerplatz in Freising im Abstand von 6 h täglich viermal die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit gemessen. Hierdurch sollten Rückschlüsse auf die unterschiedlichen Bedingungen der Lagerstandorte ermöglicht werden. Zusätzlich wurden die Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes für die Standorte Freising und Kempten erworben. Diese Daten bestanden aus den monatlichen Mittelwerten für Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit, Sättigungsdefizit und Niederschläge (zu den gemessenen Klimadaten vgl. Kapitel 5.4.3).

4.5.4.5 Parallelmessung des Wassergehalts in einzelnen Scheiten

Zur Erweiterung des Versuchs ab dem zweiten Jahr der Untersuchung wurde neben der Wiegung der Bündel und Gitterboxen jeden Monat jeweils ein Fichten- und ein Buchenscheit komplett in einzelne ca. 4 cm dicke Probestücke gesägt. Diese Stücke wurden markiert, und ihr Wassergehalt wurde nach der Trockenschrankmethode bestimmt. Diese Messungen dienten

- der Feststellung der Wassergehaltsverteilung innerhalb der Scheite (zur Bestimmung der Gewichtungsfaktoren, vgl. Kapitel 4.5.4.3),
- der Bestimmung der optimalen Probenahmeposition im Meterscheit (vgl. Kapitel 4.5.4.3), sowie der
- Feststellung des Wassergehaltsverlaufs der eingelagerten Holzscheite bzw. der Verifikation der Messungen an den Holzbündeln über die einzelnen Monate (vgl. Kapitel 5.5).

4.5.4.6 Schlussmessung nach zwei Jahren Lagerdauer

Im November 2004 wurde an beiden Standorten die Lagerung beendet und das Lager aufgelöst. Wie bei der Anfangsmessung kam es hierbei erneut auf eine möglichst genaue Massen- und Wassergehaltsbestimmung an, daher wurde der Messaufwand gegenüber den Zwischenbestimmungen deutlich erhöht. Aus jedem Bündel wurden vier Scheite außen und in der Mitte entnommen (Abb. 28). Aus diesen vier Scheiten wurden mit der Kreissäge die drei Probenscheiben wie in Kapitel 4.5.4.3 dargestellt entnommen, um den Wassergehalt nach der Trockenschrankmethode zu bestimmen.

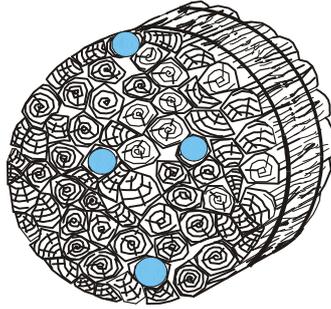


Abb. 28: Positionen der für Probennahme gewählten Scheite eines Bündels am Lagerende

4.5.4.7 Visuelle Kontrolle

Es wurde versucht, den Rindenverlust zu erfassen. Dafür wurde die Rinde, die sich im Laufe der Trocknung löste oder bei der Wiegung der Bündel verloren ging, eingesammelt und separat gewogen, um sie als eigene Verlustgröße ausweisen zu können. Weiter wurde das Holz auf eine etwaige Verstockung, einen Insektenbefall oder sonstige Auffälligkeiten kontrolliert.

4.5.5 Datenauswertung

Die Wassergehalts- und Massenbestimmungen dienten der Berechnung der Trockenmasseverluste über die gesamte Lagerdauer sowie der Beschreibung des Trocknungsverlaufes. Die Vorgehensweise bei diesen Auswertungen wird im Folgenden beschrieben.

Trockenmasseverluste. Zur Bestimmung der Trockenmasseverluste über die gesamte Lagerdauer wurde die Gesamttrockenmasse jedes Bündels bzw. jeder Gitterbox zu Beginn und am Ende der Lagerdauer errechnet und zueinander in Beziehung gesetzt. Zur Feststellung der Anfangstrockenmasse eines Bündels wurde hierzu dessen Frischmassegewicht mit dem mittleren Wassergehalt aller Holzscheite einer Holzart verrechnet. Das heißt, es wurde für jede Holzart ein einheitlicher Anfangswassergehalt angenommen. Diese Annahme beruht auf der Tatsache, dass die Scheite jeder Holzart aus einer einheitlichen Charge mit einheitlichem Erntetermin stammten, homogen vermischt waren und im winterlichen Klima kurzfristig ohne weitere Wassergehaltsverluste direkt nach der Holzernte aufbereitet worden waren. Bei der Endtrockenmasse wurde dagegen zunächst eine individuelle Trockenmasse für jedes Bündel bzw. jede Gitterbox berechnet, da hier die Wassergehaltsbestimmung gemäß Abb. 28 den Bündeln direkt zugeordnet werden konnte. Im weiteren Verlauf der Auswertungen erwies es sich jedoch aufgrund der relativ großen Streuung der Einzelmesswerte als sinnvoll, Mittelwerte für mehrere Bündel gleicher Holzart oder sogar holzartenübergreifend zu berechnen.

Der über die Lagerdauer angefallene Rindenverlust war gesondert erfasst und gewogen worden. Die entsprechende Trockenmasse wurde errechnet und als eigene Verlustgröße bezogen auf die eingelagerte Gesamtmasse ausgewiesen.

Wassergehaltsverlauf. Die über die Lagerdauer veränderliche Masse jedes Bündels bzw. jeder Gitterbox spiegelt vor allem den Verlauf der Trocknung bzw. der Wiederbefeuchtung je nach Jahreszeit wider. Während der Versuche war dieser Verlauf zunächst auf Basis der Anfangsmas-

sen und der Anfangswassergehalte aufgezeichnet worden. Bei der Endwassergehaltsbestimmung der Scheite zeigte sich jedoch, dass die Wassergehalte der Einzelmessungen wesentlich besser wiederholbar waren als zu Versuchsbeginn. Das lässt sich am berechneten mittleren relativen Variationskoeffizienten (VK) des Wassergehaltes ablesen, er betrug für die waldfrischen Scheite zu Lagerbeginn durchschnittlich 8,7% und fiel zum Lagerende bei den relativ homogen abgetrockneten Scheiten im Mittel auf 7,0% (nicht abgedeckt) und 2,8% (abgedeckt). Noch größer waren die Unterschiede bei den absoluten Wassergehaltsschwankungen zwischen den Proben, sie waren vor allem bei Lagerende besonders gering.

Die Wassergehalte der Schlussmessung sind somit zuverlässiger als die Anfangswassergehalte einzuschätzen. Somit war es sinnvoll, die Berechnungen der Wassergehalte zu den monatlichen Zwischenwiegungen nachträglich auf die Basis der Endwassergehalte zu beziehen. Bei dieser Vorgehensweise würde allerdings unterstellt, dass Trockenmasseverluste keinen Anteil an den Gewichtsänderungen haben. Da die hierzu durchgeführten Auswertungen jedoch einen eindeutigen – wenn auch geringen – Trockenmasseverlust über die zweijährige Lagerdauer ausweisen, wurde eine entsprechende Korrekturrechnung erforderlich. Dazu wurde für alle Holzarten einheitlich je nach Lagerort (Innen/Außen) ein mittlerer Verlust von 2,61% bzw. 5,66% unterstellt (vgl. Ergebnisse in Kapitel 5.6). Dieser relative Verlust wurde durch die Anzahl der Monate, über die der jeweilige Versuch lief, dividiert; daraus ließ sich nun der jeweilige Korrekturwert für jeden Lagermonat individuell errechnen. Um diesen Korrekturbetrag wurde der Wassergehaltsverlauf nun in Form einer zeitabhängigen Trockenmassegutschrift rückwirkend korrigiert.

5 Ergebnisse

5.1 Arbeitszeitbedarf für die Brennholzbereitstellung

Der Arbeitszeitbedarf für die Brennholzbereitstellung wurde in insgesamt 40 Zeitstudien untersucht. Die Bedingungen, die bei jeder Arbeitsstudie vorlagen, wurden jeweils in einer Beschreibung der Zeitstudien zusammengestellt, sie können im Anhang 10.1 nachgelesen. Als wichtiges Ergebnis wird unter anderem die technische Arbeitsproduktivität (TAP) ausgewiesen. Hierbei sind zwei Bezugsgrößen möglich, die Maschinenarbeitsstunde und die Arbeitskraftstunde. In der Abkürzung wird für "Stunde" – entsprechend dem geltenden Sprachgebrauch – uneinheitlich einmal "S" und einmal "h" verwendet, so dass die Maschinenarbeitsstunde mit "MAS" und die Arbeitskraftstunde mit "AKh" bezeichnet werden. Beide Produktivitätsangaben sind auch als "Leistungskennzahlen" zu verstehen. Die auf den Maschineneinsatz bezogene Produktivität entspricht der Maschinendurchsatzleistung.

5.1.1 Zeitbedarf bei der Jungdurchforstung (Brennholzernte)

Insgesamt wurden acht Teilstudien zur Holzernte angefertigt. Dabei wurden bewusst unterschiedliche Bestände und Verfahren aufgenommen. Zum einen sollten die jeweiligen Probanden ihr üblicherweise praktiziertes Verfahren anwenden können, zum anderen wurden dadurch aber auch die extrem unterschiedlichen Bedingungen bei der Brennholzbereitstellung im Wald dokumentiert. Der Schwerpunkt der Arbeitsstudien in der Jungdurchforstung lag bei der Baumart Fichte. Zu den acht Teilstudien wurden die vorkommenden Bestände sowie relevante Kenngrößen, Maschinen- und Verfahrensdaten in einer Beschreibung der Teilstudien zusammengestellt. Exemplarisch ist eine Beschreibung für die Teilstudie 1 aufgeführt (Tab. 6). Alle weiteren Beschreibungen befinden sich im Anhang 10.1.

Tab. 6: Zeitstudienbeschreibung: Holzernte Teilstudie 1 mit Fichte

Aufnahmedatum	04./05./09.03.2004
	Wuchsbezirk 13.2 „Münchner Schotterebene“, Isar-Auwald Raum Freising
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 75% Fichte, 25% Esche Alter: 25 – 50 Jahre Nutzungs-/Durchforstungsart: Jungdurchforstung (JD)
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 11,22 cm Mittlerer MDM: 8,81 cm Mittleres Rohschaftvolumen: 0,0649 Fm m. R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 8,8 m
Behinderungen	Bewuchs: keine Behinderung auf 95% der Fläche, 5% mit behinderndem Bewuchs Gelände: keine Behinderung auf 100% der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 0% Witterung/Wettereinflüsse: keine Behinderung
Arbeitskräfte	Arbeiter: männlich, 30 Jahre, komplette Schutz- und Ar- beitsausrüstung vorhanden
Maschinenausstattung	Motorsäge: Stihl 020
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung Vermessen mit Hilfe eines Rollmaßbandes Ablängen auf 1-Meter-Stücke, kein Spalten Vorlieferung bis zur Rückegasse, Abholung des Holzes er- folgt zu späterem Zeitpunkt

Die erarbeitete Datengrundlage dient primär der generellen Abschätzung der üblichen Leistungs- und Arbeitszeiten bei der Brennholzernte. In den Teilstudien 1, 2 und 3 (Fichte) wurde jedoch eine besonders umfangreiche und aussagefähige Datenbasis erarbeitet, so dass diese Studien auch eine weitergehende Auswertung über die Abhängigkeit der Gesamtarbeitszeit und Leistung vom Holzvolumen zulassen.



Abb. 29: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zur Holzernte

5.1.1.1 Die Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte

In der Teilstudie 1 ist der Proband ein ausgebildeter Forstwirt, der allerdings nicht mehr täglich in der Holzernte tätig ist. Die gesamte Zeitstudie hatte einen zeitlichen Umfang von 749 Minuten. In dieser Zeit wurden 97 Fichtenstämme zu Brennholz aufgearbeitet. Die größten Zeitanteile (80%) werden von den Ablaufabschnitten Fällen, Asten/Ablängen und Vorliefern eingenommen (Abb. 30). Dies gilt für alle untersuchten Probanden. Die Allgemeinen Zeiten (Rüsten, SVZ, PVZ) nehmen dagegen mit ca. 12% der gesamten Arbeitszeit in allen Studien einen relativ geringen Wert ein. Die fertigen Rundlinge mit 1 m Länge trug der Proband jeweils an die Rückegasse, wobei hier meist mehrere Bäume in einem Arbeitsschritt vorgeliefert wurden. Bei den weiteren Auswertungen wurden die Vorlieferzeiten pauschalisiert nach Zeitbedarf je 1-m-Rundlinge den einzelnen Zyklen zugeordnet. In der Teilstudie 2 war die Arbeitsweise der Probanden (Nebenerwerbslandwirte) augenscheinlich routiniert. 50 Fichten wurden während eines Beobachtungszeitraumes von 346 Minuten gefällt und dabei wurden ca. 3,91 Fm m. R. Brennholz produziert. Die Gliederung der Zeitanteile ist mit der in Teilstudie 1 vergleichbar. Mit 46% hat das Asten/Ablängen den größten Zeitanteil, danach folgen die Vorliefer- und Fälltätigkeit (Abb. 30). In der Teilstudie 3 beanspruchte die meiste Zeit das Asten und Ablängen der Stämme. Die Studie dauerte 331 Minuten, dabei wurden dabei 41 Fichten (5,57 Fm m. R.) aufgearbeitet. Es wurden 2-m-Rundlinge abgelängt und zur Rückegasse getragen. Der untersuchte Selbstwerber in der Teilstudie 4 stellte bis zum Zeitpunkt der Untersuchung nur kleinere Mengen an Brennholz für den Eigenbedarf bereit und war deshalb wenig routiniert. Besonders hervorstechend ist der hohe Zeitanteil „Vorliefern“ (Abb. 30). Dies ist dadurch begründet, dass der Proband das Brennholz im Durchschnitt mindestens 50 m von Hand transportieren musste. Da dem Brennholz-Selbstwerber nur der eigene Pkw

mit Anhänger zur Verfügung stand, musste das aufgearbeitete Holz zur nächsten Pkw-befahrbaren Stelle gebracht werden. Unter dem Ablaufabschnitt „Sonstige Zeiten“ werden z. B. Rückfragen, Anweisungen u. ä. summiert. Die Studie dauerte insgesamt 132 Minuten, es wurden dabei nur 11 Fichten mit einem Volumen von 0,56 Fm m. R. aufgearbeitet und vorgeliefert.

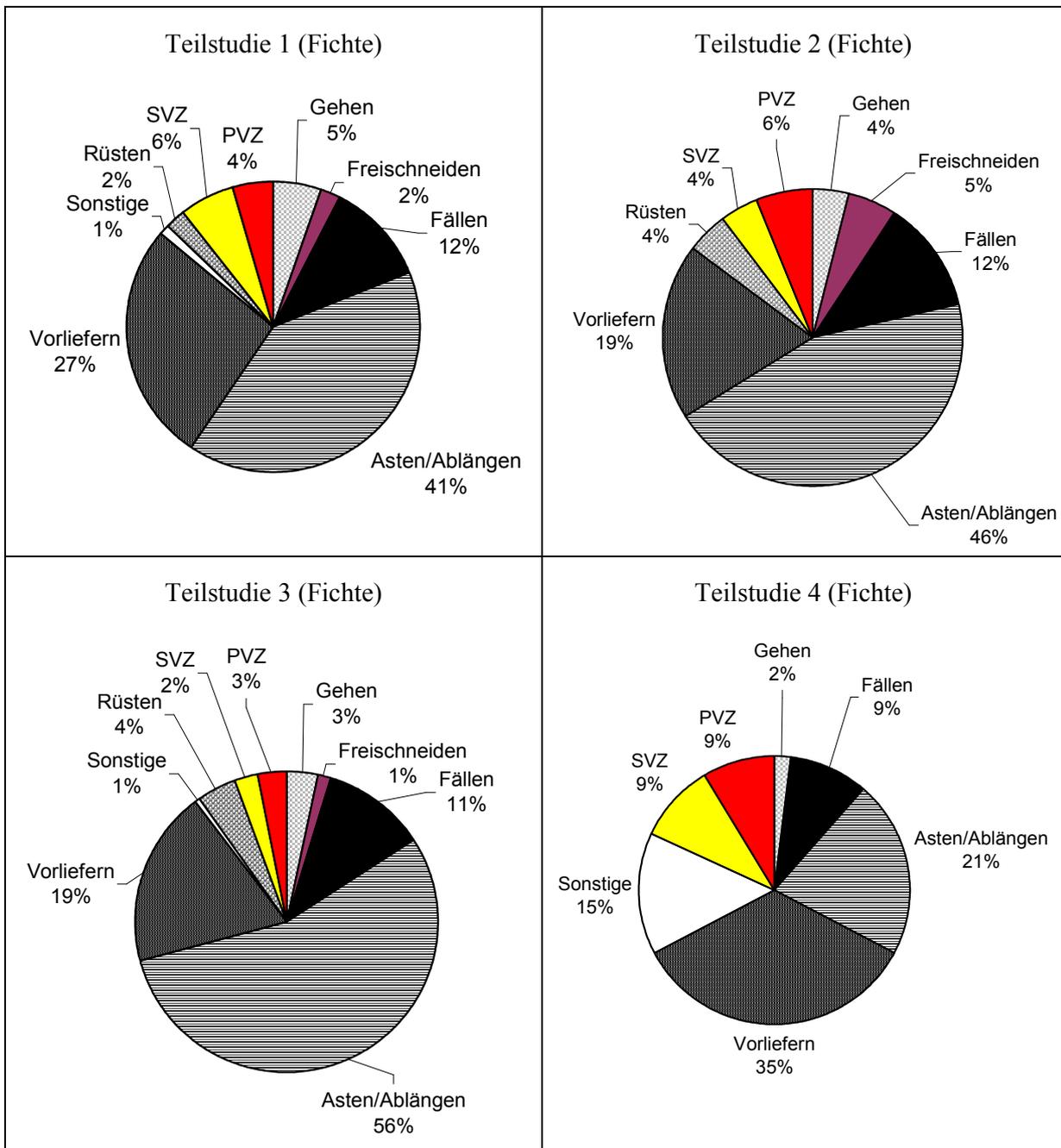


Abb. 30: Die Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte der Teilstudien 1 bis 4 (Fichte) bei der Jungdurchforstung (PVZ: persönliche Verteilzeit; SVZ: sachliche Verteilzeit)

Der Proband in der Teilstudie 5 ist langjähriger Brennholz-Selbstwerber. Anders als bei den vorherigen Zeitverteilungen wird hier ein neuer Teilabschnitt „Seilarbeit“ eingeführt, während der

Abschnitt „Vorliefern“ fehlt (Abb. 31). Unter Zuhilfenahme einer eingebauten Kleinseilwinde, die am Geländewagen des Selbstwerbers befestigt war, war es möglich, Bäume zu Boden zu ziehen, die aufgrund von Schlinggewächsen im Bestand festgehalten wurden. Diese Tätigkeiten werden unter dem Begriff „Seilarbeit“ aufgeführt. Der Beobachtungszeitraum betrug 135 Minuten, in dieser Zeit wurden 18 Kiefern zu 0,79 Fm m. R. Brennholz aufgearbeitet. Die beobachtete Familie in der Teilstudie 6 war im Wechsel mit vier Personen im Einsatz, wobei zumeist drei Personen tatsächlich im Wald arbeiteten. Neben zwei männlichen Arbeitskräften (Alter 40 und 65 Jahre) war auch ständig eine ältere Frau (75 Jahre) beim Asten (Axt), Vorliefern und Laden beteiligt. Von den männlichen Arbeitskräften wurden Zeitstudien angefertigt. Da sich die Arbeiter an keinen zyklischen Arbeitsablauf hielten, konnte keine zyklische Auswertung erfolgen. Als neuen Ablaufabschnitt wurde die Tätigkeit „Laden“ aufgenommen, da parallel zur Aufarbeitung auch das Beladen des Brennholzes auf einen Anhänger stattfand (Abb. 31). 72 Kiefern wurden gefällt und zu 1,75 Fm m. R. aufgearbeitet. Da innerhalb des Bestandes der Teilstudie 7 eine Teilfläche eine starke Steigung aufwies, wurden von den zwei Arbeitern zunächst nur Rohschäfte aufgearbeitet. Diese wurden zu einem späteren Zeitpunkt mit einer Seilwinde beigezogen und anschließend an der Forststraße abgelängt. Die Gesamtarbeitszeit betrug 487 min; während dieser Zeit wurden von den zwei Arbeitern 23 Stämme mit 4,77 Fm m. R. aufgearbeitet. Das Vorliefern bezieht sich in erster Linie auf die vollständig aufgearbeiteten Kronen. Der Abschnitt „Freischneiden“ beinhaltet zusätzlich noch das Konzentrieren der schwächeren Kronenäste auf einen Haufen, deshalb wird dafür – im Gegensatz zu den Studien in den Nadelwäldern – ein beachtlicher Zeitananteil von 19% benötigt (Abb. 31). Die bereits in den Teilstudien 2 und 3 genannten Probanden wurden ein weiteres Mal in der Teilstudie 8 untersucht. Doch anstatt junge Fichten wurden diesmal stärkere Eschen gefällt. Für das Abziehen hängen gebliebener Bäume bzw. das Beiziehen der Rohschäfte zur nächsten Rückegasse wurde ebenfalls wieder eine Seilwinde eingesetzt. Insgesamt wurden 17 Eschen mit einem Rohschaftvolumen von 7,4 Fm m. R. in 314 Minuten gefällt. Das zusätzlich aufgearbeitete Kronenmaterial mit ca. 10% des Rohschaftvolumens wurde nicht berücksichtigt.

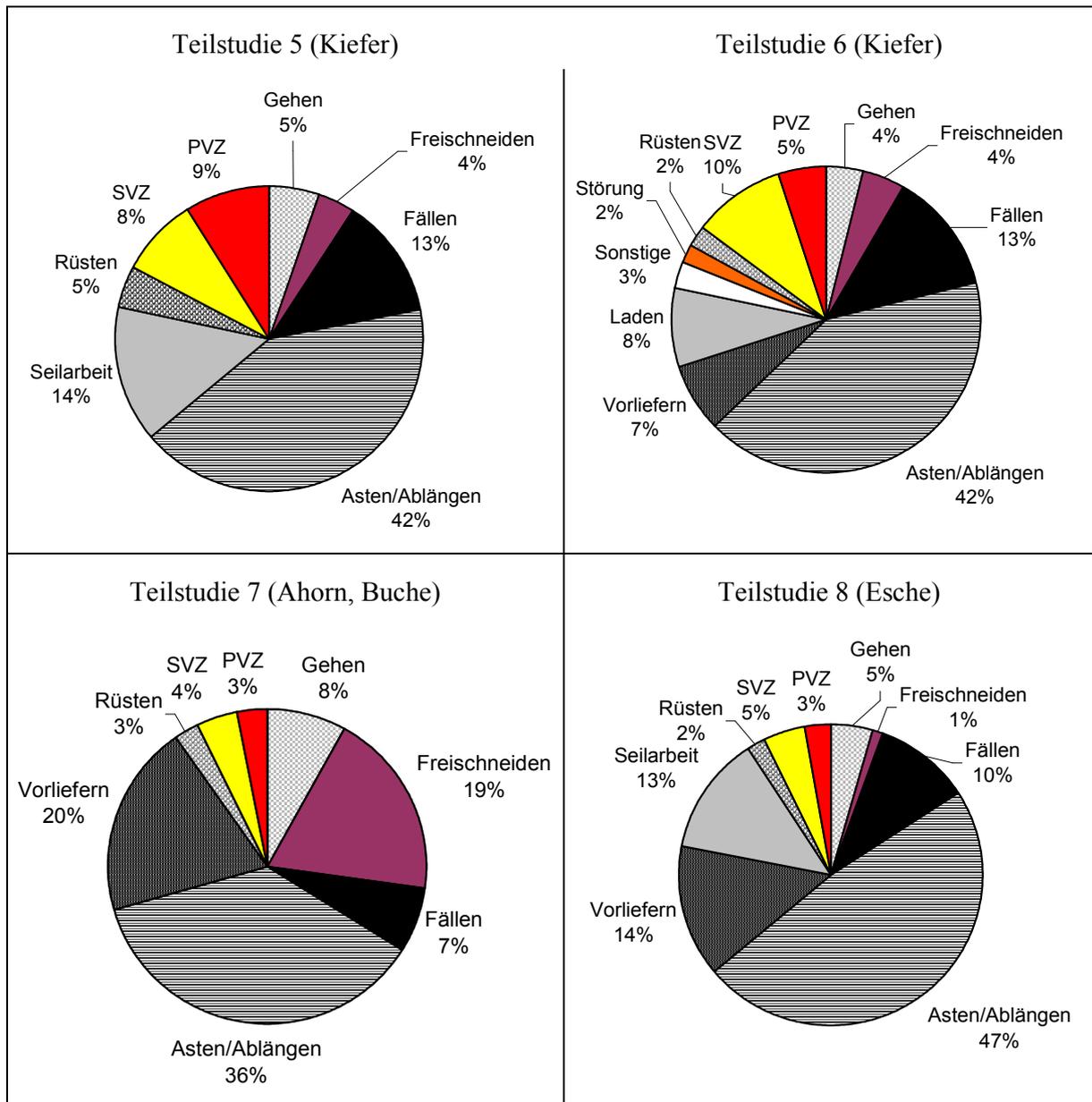


Abb. 31: Die Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte der Teilstudien 5 bis 8 (weitere Baumarten) bei der Jungdurchforstung (PVZ: persönliche Verteilzeit; SVZ: sachliche Verteilzeit)

5.1.1.2 Die Zyklusdauer bei der Jungdurchforstung

Wird die Zyklusdauer mit dem verarbeitenden Rohschaftvolumen in Relation gesetzt, so bestätigen die logarithmischen Abhängigkeiten der Teilstudien 1 bis 3 (Abb. 32), dass mit steigendem Volumen des Einzelbaumes auch die reine Arbeitszeit (RAZ) steigt. In der Teilstudie 2 war der Zeitbedarf insgesamt geringer als in der Teilstudie 1 oder 3.

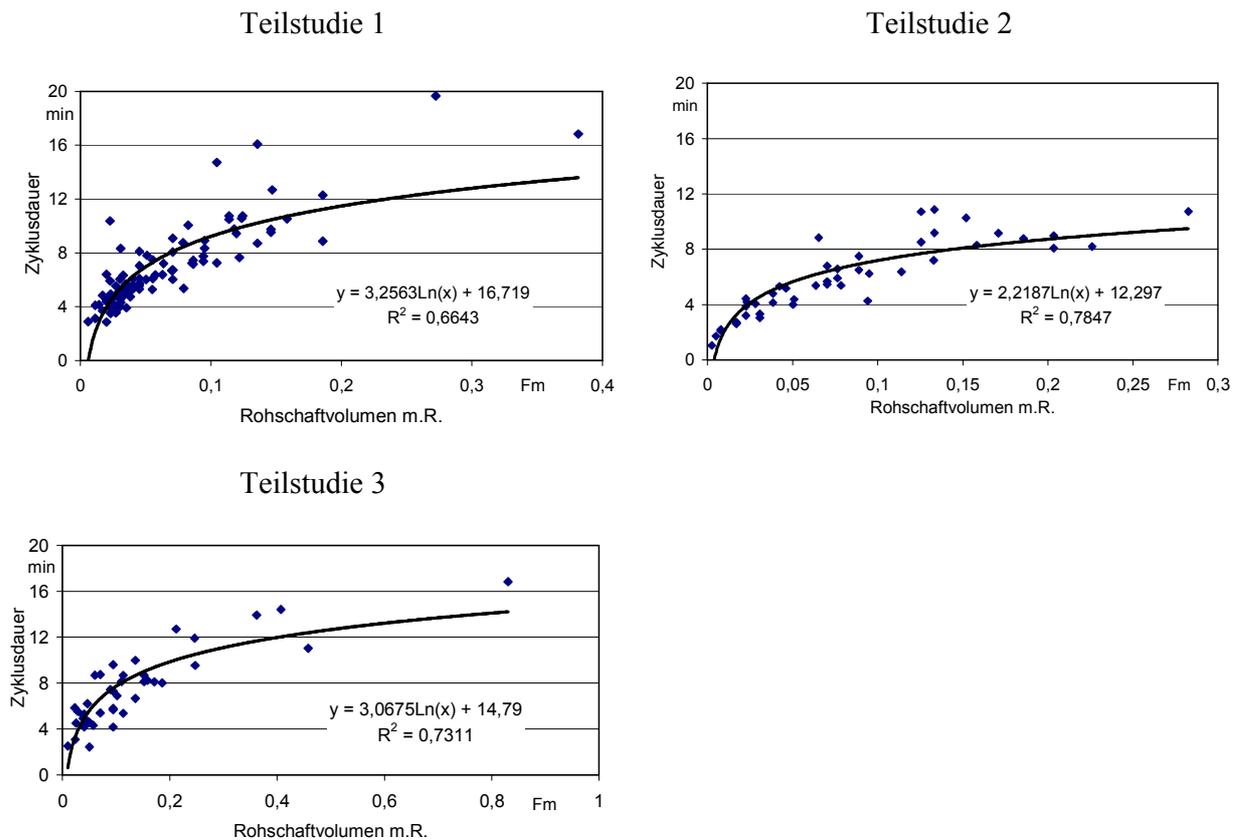


Abb. 32: *Arbeitszyklusdauer in Abhängigkeit vom Rohschaftvolumen m.R. (mit Rinde)*

5.1.1.3 Der spezifische Zeitbedarf bei der Holzernte

Abb. 33 zeigt die Abhängigkeit in den Teilstudien 1 bis 3 des spezifischen Zeitbedarfs pro Festmeter vom Volumengehalt der bearbeiteten Bäume. Die Kurve beschreibt einen degressiv sinkenden Verlauf. Um einen Festmeter Fichten-Brennholz aufzuarbeiten, muss bei geringem Einzelbaum-Volumen ein Vielfaches der Zeit aufgewendet werden, die für ein großes Einzelbaum-Volumen erforderlich ist. Dies beschreibt das sogenannte Stück-Masse-Gesetz.

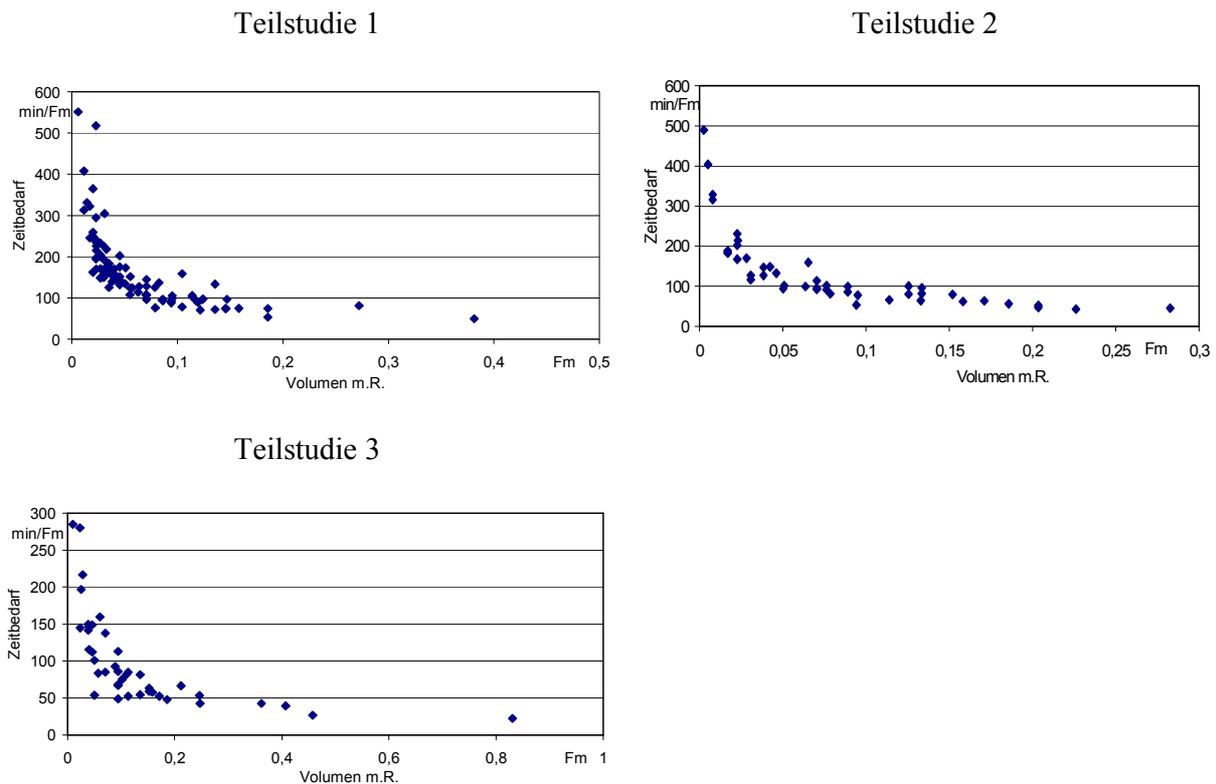


Abb. 33: Spezifischer Zeitbedarf bei unterschiedlichen Schaftvolumina (GAZ, Fm m.R. mit Rinde)

5.1.1.4 Die Arbeitsproduktivität

Damit eine durchgehende Vergleichbarkeit der Ergebnisse gewährleistet ist, wird die Arbeitsproduktivität als Quotient aus der gesamten aufgearbeiteten Brennholzmenge und der dafür insgesamt benötigten Arbeitszeit inklusive allgemeiner Zeiten gebildet. Die Zeitanteile der Ablaufabschnitte zu allen Arbeitsstudien sind in Tabellen im Anhang 10.1 dargestellt. Die technische Arbeitsproduktivität der einzelnen Teilstudien zeigt Tab. 7. Sie liegt zwischen 0,18 Fm/AKh (Teilstudie 4) und 1,42 Fm/AKh (Teilstudie 8). Alle Studien zusammen haben einen Mittelwert von 0,56 Fm/AKh.

Tab. 7: Die technische Arbeitsproduktivität (TAP) der einzelnen Teilstudien der Durchforstung in Fm m.R. pro Stunde

	Teilstudie 1 (Fm/h)	Teilstudie 2 (Fm/h)	Teilstudie 3 (Fm/h)	Teilstudie 4 (Fm/h)	Teilstudie 5 (Fm/h)	Teilstudie 6 (Fm/h)	Teilstudie 7 (Fm/h)	Teilstudie 8 (Fm/h)
TAP	0,50	0,68	1,01	0,25	0,18	0,18	0,29	1,42

In der Teilstudie 6 konnte im Gegensatz zu den vorgenannten Arbeitsstudien die Produktivität aufgrund des speziellen Aufarbeitsverfahrens nur als Quotient aus Gesamtmenge und Gesamtarbeitszeit berechnet werden. Die dafür zugrunde gelegte Gesamtarbeitszeit setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Der Arbeitszeit der beiden in der Arbeitsstudie begleiteten Motorsägenführer, jedoch ohne Ladezeiten,
- 50% der Arbeitszeit (gutachterliche Schätzung) der 75-jährigen Probandin, da diese einen Hauptteil der Zeit beim Laden verbrachte,
- 60 Minuten des dritten Motorsägenführers, der nur vorübergehend an der Aufarbeitung beteiligt war.

Die daraus resultierende technische Arbeitsproduktivität (TAP) lag mit 0,18 Fm (m. R.) pro Stunde auf dem gleichen Niveau wie in der Teilstudie 5. Beide Studien wurden zwar im gleichen Kiefernbestand durchgeführt, jedoch waren die Einzelvolumina in Teilstudie 6 noch geringer. Auch hier kam es zu Behinderungen aufgrund von Schlingpflanzen (Waldrebe, Wilder Hopfen), die oftmals den Fall der Bäume behinderten. Obwohl in der Teilstudie 7 für die Zeitanteilsbestimmung nur eine Zeitstudie erstellt wurde (nur ein Arbeiter wurde beobachtet), konnte in der Leistungsberechnung die Arbeitszeit beider Personen berücksichtigt werden. Daraus ergibt sich eine technische Arbeitsproduktivität (TAP) von 0,29 Fm (m. R.) pro Stunde. In der Teilstudie 8 betrug die aus den arithmetischen Mittelwerten der Zyklen berechnete technische Arbeitsproduktivität (TAP) für die gesamte Arbeitszeit 1,49 Fm (m. R.) pro Stunde (inkl. AZ-Anteile). Die TAP, die sich aus der gesamten Brennholzmenge und der insgesamt benötigten Arbeitszeit errechnet, betrug 1,42 Fm (m. R.) pro Stunde (vgl. hierzu auch Erläuterungen zu Teilstudie 1). Damit ist die hier erreichte Leistung unter allen durchgeführten Studien am höchsten, der Hauptgrund ist sicherlich in den hohen Stückmassen der geernteten Eschen zu suchen.

5.1.2 Zusammenfassung der Ergebnisse der Teilstudien der Holzernte

Die beschriebenen Brennholz-Bereitstellungsverfahren der Holzernte variieren teilweise deutlich in den Arbeitsabläufen, da keine einheitlichen Standardverfahren eingesetzt wurden. Eine differenzierte Darstellung der Leistungs- und Arbeitszeitbedarfswerte bei verschiedensten Ausgangsbedingungen (Stück-Masse, Bestand, Gelände, Erschließung, Ausrüstung, Fertigkeiten, Leistungsfähigkeit) erscheint aus den hier vorgestellten stichprobenhaften Untersuchungen nicht möglich.

Dennoch soll im Folgenden versucht werden, Empfehlungen für die Praxis aus den hier gewonnenen Ergebnissen und Erfahrungen abzuleiten und darzustellen. Abb. 34 stellt die starke Variation der Leistungswerte bei den durchgeführten Arbeitsstudien dar. Dabei zeigt sich, dass die Produktivität (TAP gesamt) je nach Arbeitsbedingungen zwischen 0,18 und 1,42 Fm/h streuen kann. Entsprechend breit können damit auch die Arbeitskosten für die Brennholzernte im Wald streuen (vgl. 5.9.6).

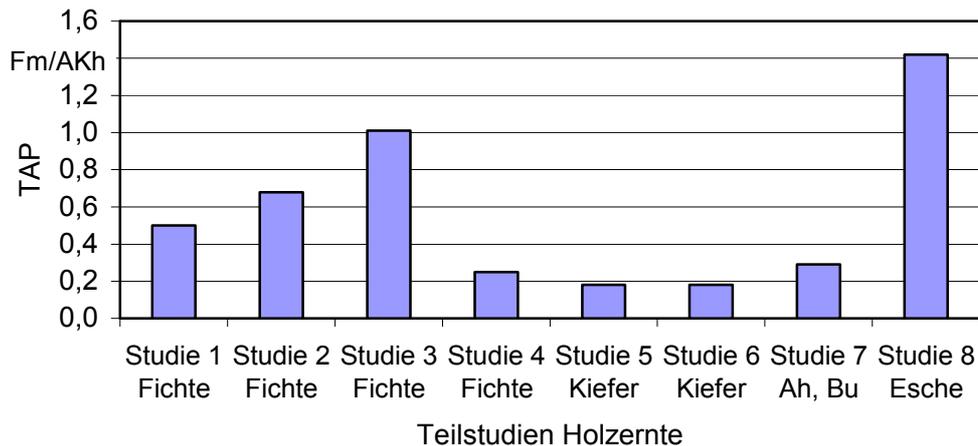


Abb. 34: Zusammenstellung der Ergebnisse der gemessenen technischen Arbeitsproduktivität aller durchgeführten Arbeitsstudien
Ah Ahorn, Bu Buche

Die in Abb. 34 gezeigte Schwankungsbreite erschwert die Festlegung praxisgerechter Zeitbedarfswerte. Eine Orientierung und Einordnung könnte aber der jahrzehntelang benutzte und bewährte Holzerntetarif EST (Erweiterter Sortentarif) bieten. Die dort angegebenen Vorgabewerte lassen sich ebenfalls als Kalkulationswerte für den Zeitbedarf verwenden [31]. Die drei umfangreichsten Arbeitsstudien der vorliegenden Holzernteuntersuchung wurden mit den Vorgabezeiten des EST verglichen. Dazu wurde eine Umrechnung der in den Arbeitsstudien ermittelten Zeitbedarfsdaten je Festmeter auf die Bezugsgröße Raummeter (Rm) erforderlich. Es ist hierzu der (nach gesetzlicher Handelsklassensortierung HKS) einheitliche Umrechnungsfaktor von 1,25 Rm/Fm angesetzt, da zum Zeitpunkt der EST Einführung 1979 keine anderen Umrechnungsfaktoren bekannt waren. Zusätzlich wird in Tab. 8 der Zeitgrad mit dem neu ermittelten Umrechnungsfaktor (vgl. 5.8.1) von 1,55 Rm/Fm für Fichte mit Rinde angegeben.

Tab. 8: Übersicht der Zeitgrade bei den Teilstudien zur Holzernte

Teilstudien	Zeitgrad bei Faktor 1,25	Zeitgrad bei Faktor 1,55
Teilstudie 1	158%	196%
Teilstudie 2	202%	250%
Teilstudie 3	212%	263%

Die errechneten Ausgleichs-Hyperbeln der Teilstudie 1 und der Vorgaben aus dem EST haben einen sehr ähnlichen Verlauf (Abb. 35). Der tatsächliche Zeitbedarf liegt deutlich unter den EST-Vorgaben (Zeitgrad 100%). Die Vorgabezeiten beginnen beim EST erst ab einem Mittendurchmesser (MDM) von 10 cm; um jedoch eine Vergleichbarkeit der Werte herzustellen, wurden die EST-Zeiten bis zu einem Mittendurchmesser von 6 cm extrapoliert.

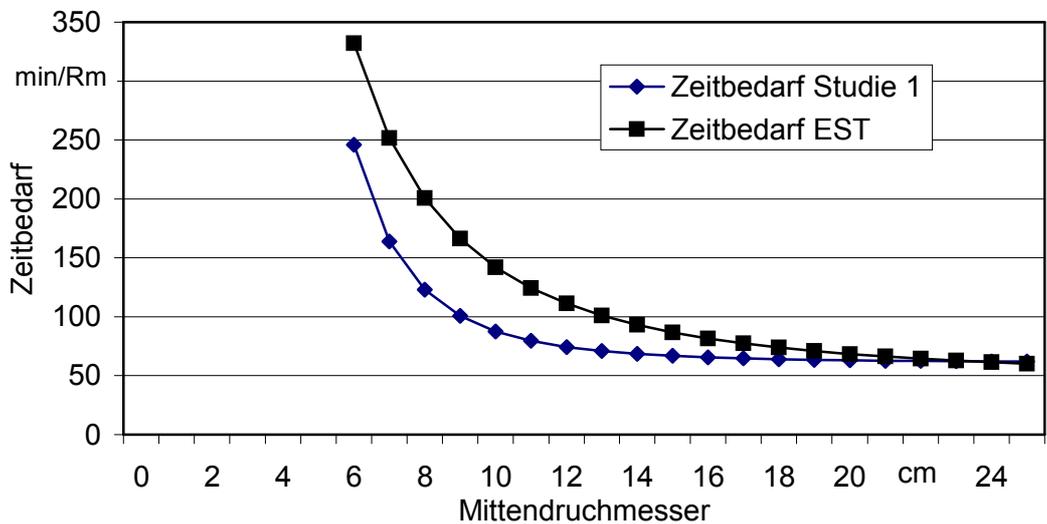


Abb. 35: Tatsächlicher Zeitbedarf nach Teilstudie 1 und EST-Zeitbedarf

Im Gegensatz zur Teilstudie 1 wurden bei den Teilstudien 2 und 3 jeweils Rundholz mit zwei Meter Länge aufbereitet; zudem war die Vorlieferentfernung etwas länger. Auch hier ergibt sich ein ähnlicher Hyperbel-Verlauf. Die beiden Probanden benötigten jedoch deutlich weniger Zeit, als im Erweiterten Sortentarif angegeben wurde (Abb. 36).

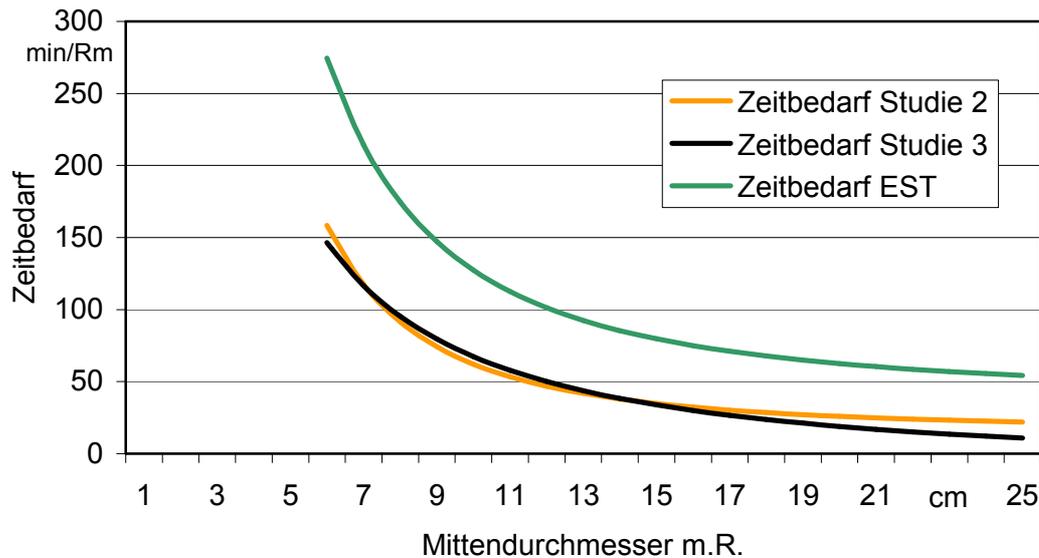


Abb. 36: Tatsächlicher Zeitbedarf und EST-Zeitbedarf, Teilstudien 2 und 3.

Das Verhältnis der tatsächlich benötigten Zeit zu der Vorgabezeit des EST entspricht dem Zeitgrad in Prozent. Für die festgelegten Vorgabezeiten gilt der Zeitgrad 100%. Im Laufe der Zeit wurden von den professionellen Waldarbeitern immer höhere Zeitgrade erreicht, d. h. die Arbeiter waren in der Regel schneller mit der jeweiligen Tätigkeit fertig, als dies der Erweiterte Sortentarif (EST) eigentlich vorgab. Mittlerweise wird für Zeitbedarfskalkulationen bei Waldarbeitern vom Kuratorium für Waldarbeit und Forsttechnik (KWF) ein Zeitgrad von 150% angesetzt (mittleres Zeitgradniveau Tarifgebiet West 158%, Ost 148%). Jacke [31] setzt bei seinen Zeitbedarfskalkulationen den Zeitgrad mit 160% an. In der Teilstudie 1 erreichte der Proband einen Zeitgrad von ca. 158%, die Probanden der Teilstudien 2 und 3 lagen im Bereich von 200%. Die Ursachen für diesen hohen Zeitgrad können verschiedenartig sein. Der Hauptgrund dürfte in der hohen Motivation und Leistungsbereitschaft der Probanden aus den Teilstudien 2 und 3 liegen. Zudem waren sie augenscheinlich gut eingeübt und sind aufgrund ihrer häufigen Brennholzaufarbeitung (Brennholzhändler) hinsichtlich Verfahren, Ausrüstung und dem Übungsgrad als professionell zu bezeichnen. Außerdem ist noch zu beachten, dass sie die beschriebenen Arbeiten nicht täglich, sondern maximal zwei bis drei Tage pro Woche in der Winterperiode durchführten.

5.1.3 Zeitbedarf bei der Brennholzaufbereitung

5.1.3.1 Spalten mit der Axt oder dem Spalthammer

Für das Spalten mit der Axt oder dem Spalthammer wird nur eine einzelne Arbeitskraft benötigt. Bei den hier beobachteten Probanden handelte es sich um einen jungen Landwirt, der regelmäßig Holz mit der Axt spaltet und daher als geübt gelten kann (Axtspalten) bzw. um einen jungen Diplom Forstwirt, der unregelmäßig Holz spaltet aber dennoch als ein sehr leistungsfähiger Proband einzustufen ist (Spalthammer). Die Rahmenbedingungen zu den Teilstudien sind in Anhang 10.1 zusammengestellt.

Die Zeitnahme erstreckte sich über eine Gesamtzeitspanne von fünf Stunden (Axtspalten) bzw. drei Stunden (Spalthammer). Dabei lag die maximale Länge des zu spaltenden Holzstücks bei 33 cm. Die zu spaltenden Sortimente bestanden zum einen aus Rundlingen der Holzarten Buche und Fichte, die auf die gewünschte Größe gespalten wurden (Teilstudien SP 1 und SP 2) und zum anderen in grob gespaltenen Fichtenscheiten, die noch weiter zerkleinert werden sollen (Studie AX 1). Diese groben Scheite entstehen beispielsweise beim Spalten mit dem großen Senkrechtspalter, nachdem die entstandenen Meterscheite auf 33 cm abgelängt wurden. Die zusätzliche Spaltzerkleinerung ist für Öfen mit einem besonders kleinen Brennraum wie z. B. Heizungsherde oder kleine Einzelöfen erforderlich.



Abb. 37: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit Spalthammer

An der Verteilung der einzelnen Arbeitsablaufabschnitte lässt sich ablesen, in wie weit der Arbeitsplatzes optimal gestaltet war. Je mehr Zeit auf das eigentliche Spalten verwendet wird, desto näher liegt das Holzlager und es wird relativ wenig Zeit mit unnötigen Scheittransporten zwischen Spaltplatz und Lager verbracht. Abb. 38 zeigt, dass der Arbeitsplatz beim Spalten mit dem Spalthammer (SP 1 und 2) demnach wegen des hohen Zeitanteils für "Holz spalten" (durchschnittlich

76% der Gesamtzeit (GAZ)) günstiger gestaltet war als beim Spalten mit der Axt (AX1: 36% der GAZ).

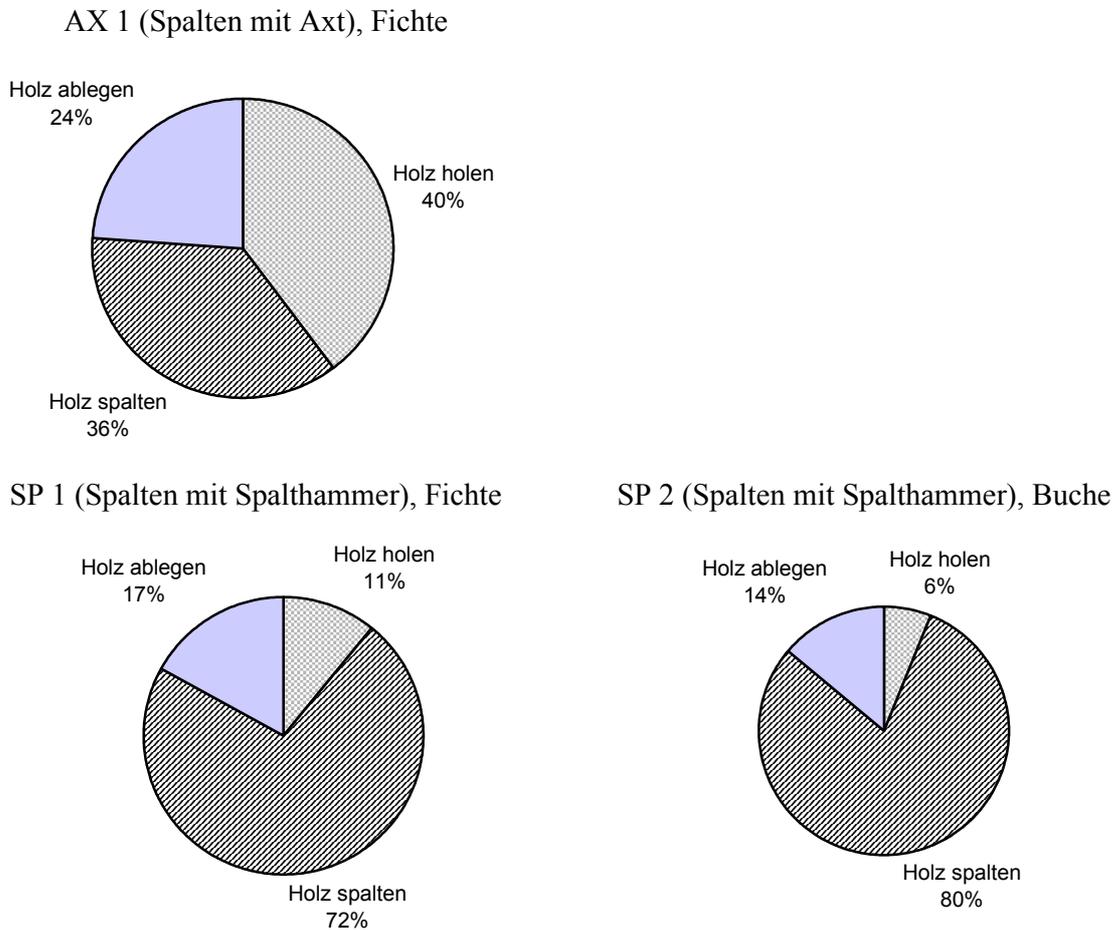


Abb. 38: Die zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte der Teilstudien zum Axtspalten (AX 1) und zum Spalten mit Spalthammer (SP 1 und 2)

Beim Spalten mit der Axt (AX 1) wurden drei Arbeitsblöcke von je einer Stunde untersucht; sie waren jeweils durch eine Stunde Pause unterbrochen. Die durchschnittlichen Zeiten der einzelnen Ablaufabschnitte für "Holz spalten" zeigen – wie in Abb. 39 dargestellt – zunächst einen Trainingseffekt, d. h. sie werden im zweiten Arbeitsblock zunächst etwas besser. Danach setzt aber offenbar im dritten Arbeitsblock eine Ermüdung ein. Allerdings deutet der deutlich erhöhte Wert für das "Holz holen" auch auf die nun größere Entfernung des gelagerten Holzes zum Hackstock hin.

Die für das Axtspalten gemessene durchschnittliche Spaltleistung (Produktivität) lag bei der Holzart Fichte bei 1,3 Schüttraummeter pro Stunde (SRm/AKh). Da der Ermüdungseffekt trotz einstündiger Pausen bereits nach zwei Stunden eintrat, ist davon auszugehen, dass diese Leistung nur über eine kurze Zeit und bei relativ kleinen Holzvorräten tatsächlich erzielt werden kann. Die Ermüdung und die gemessene Leistung zeigen, dass sich das Verfahren für eine professionelle Scheitholzbereitstellung nicht eignet.

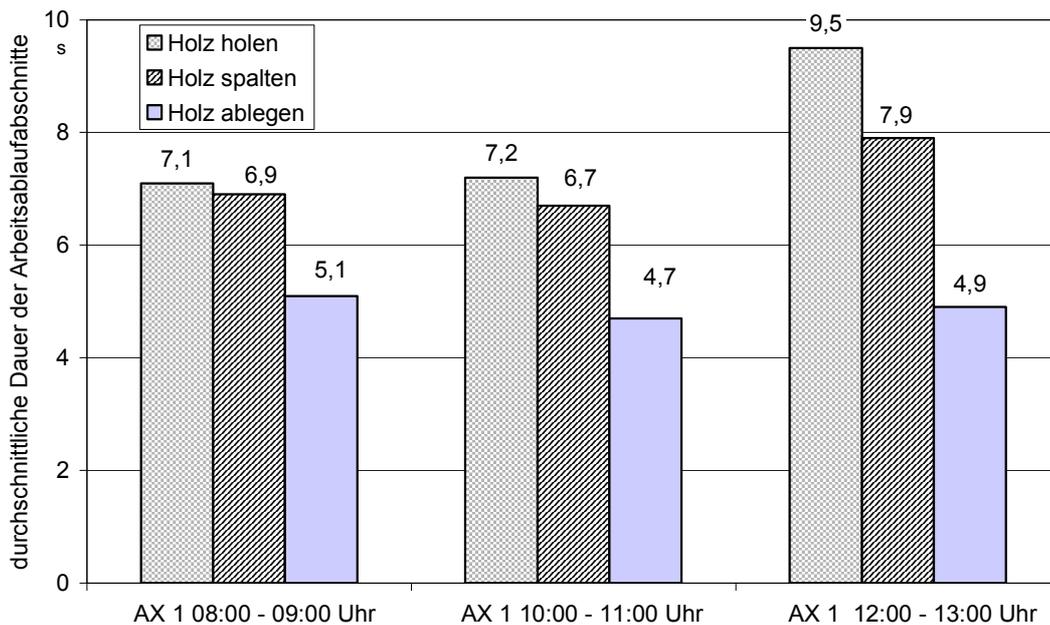


Abb. 39: *Durchschnittliche Dauer der drei einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim manuellen Spalten mit der Axt (AX 1) bei der Holzart Fichte*

Mit dem Spalthammer wurden 33 cm lange Rundlinge (Rollen) von Fichte (*Picea abies*) und Buche (*Fagus sylvatica*) gespalten. Ein Vergleich der Werte zum Axtspalten und zum Spalthammerverfahren lässt sich für die Holzart Fichte darstellen (Abb. 40). Dabei zeigt sich, dass der Arbeitsablaufabschnitt "Holz holen" beim Spalthammer mit durchschnittlich 5,4 s besser bewertet ist als beim Spalten mit der Axt (7,9 s), was einen weiteren Hinweis auf die bessere Arbeitsplatzgestaltung liefert. Der Spalthammer ist schwerer als eine Axt, so dass sich auf Grund des unterschiedlichen Arbeitsgerätes für den Spaltvorgang selbst ein größerer Zeitbedarf als für das Axtspalten ergibt (Abb. 40). Hinzu kommt, dass das Holz beim Spalthammereinsatz aus Rundlingen mit durchschnittlich 14,3 cm (Fichte) Mittendurchmesser bestand, während die Axt zum Zerkleinern von wesentlich dünneren, bereits vorgespaltene Scheiten verwendet wurde. Folglich ist die Zeit für das Spalten mit dem Spalthammer mit 33,3 s deutlich größer, sie liegt beim 4,7-fachen der Zeit für das Axtspalten.

Die Arbeitsleistung (Produktivität) lag beim Spalthammereinsatz bei 0,43 Fm/AKh bei Fichtenholz bzw. bei 0,12 Fm/AKh bei Buchenholz, das entspricht umgerechnet 1,08 bzw. 0,29 SRm/AKh und liegt deutlich unter dem Wert für das Axtspalten (1,3 SRm/AKh bei Fichte, siehe oben). Die Umrechnung erfolgte hierzu nach den Ergebnissen aus Kapitel 5.8.1.

Der beträchtliche Unterschied zwischen den Holzarten ist auf die Holzstruktur und möglicherweise auf den Wassergehalt zurückzuführen. Das Holz der Buche ist härter und war zum Spaltzeitpunkt schon etwas getrocknet. Hinzu kommt, dass die Buchenrundlinge mit durchschnittlich 21,6 cm Durchmesser deutlich stärker und damit schwerer als die Fichtenrundlinge (14,3 cm Durchmesser) waren. Für das manuelle Spalten mit einem Spalthammer sind große Durchmesser besonders nachteilig, das gilt prinzipiell umso mehr auch für das Axtspalten, welches aber nur in einer einzigen Holzstärke untersucht worden war.

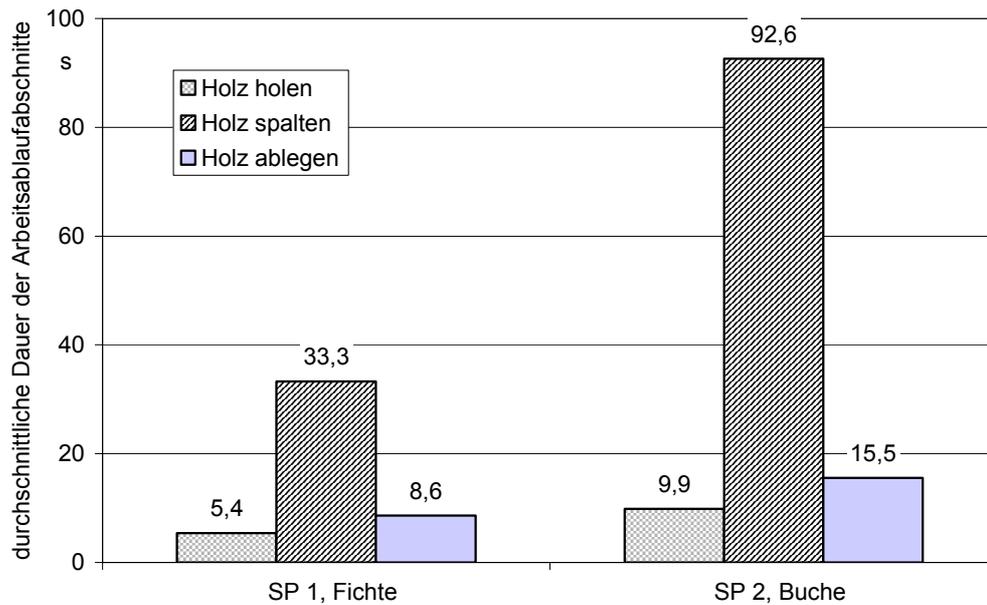


Abb. 40: Durchschnittliche Dauer in Sekunden der drei einzelnen Arbeitsablaufabschnitte beim manuellen Spalten mit dem Spalthammer (Teilstudien SP 1 und 2)

5.1.3.2 Spalten mit kleinem Senkrechtpalter

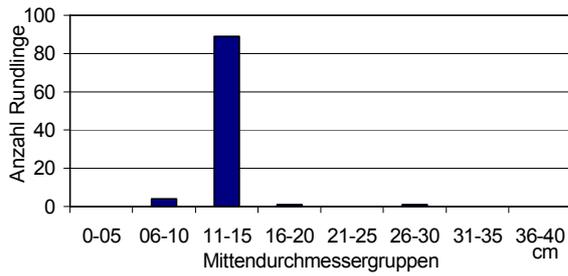
Für das Spalten mit dem kleinen Senkrechtpalter (KS) wird nur eine einzelne Arbeitskraft benötigt (Abb. 41). Bei den Probanden handelte es sich um den oben beschriebenen jungen Diplom Forstwirt, der als leistungsfähig einzustufen ist. In insgesamt sechs Teilstudien KS 1 bis 6 wurde das Spalten von insgesamt 332 Buchen- und 419 Fichtenholzrundlingen (*Fagus sylvatica*, *Picea abies*) mit 33 cm Länge über eine Dauer von insgesamt 06:52 h untersucht, wobei keine verschiedenen Spalterfabrikate eingesetzt wurden. Die Maschinen und Einsatzbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 10.1 zusammengestellt.

Als Ausgangsmaterial wurden Rundlinge mit einem mittleren Mittendurchmesser von 12,3 cm verwendet, dieses Rohmaterial ist durch die Mittendurchmesserverteilung in Abb. 42 beschrieben. Vor allem der Vergleich der Hölzer in Teilstudien KS 1 und 2 mit KS 6 zeigt, dass unterschiedliche Sortimente verwendet werden. Die Teilstudie KS 5 hat eine zum Gesamtmittelwert ähnliche Verteilung und kann daher als typisch für das hier betrachtete Ausgangsmaterial angesehen werden (vgl. Abb. 42, Gesamt KS).

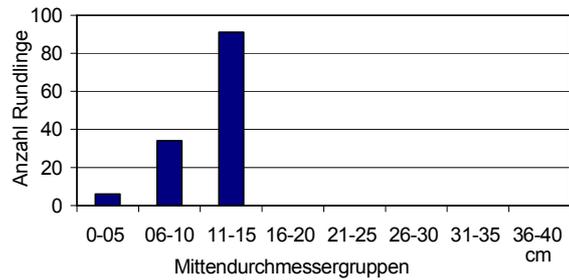


Abb. 41: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit kleinem Senkrechtpalter

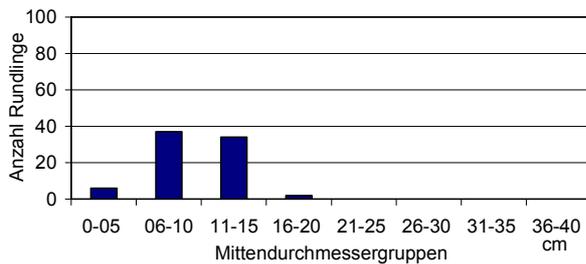
KS 1 und KS 2 (Fi Bu; n=123; 13,6 cm)



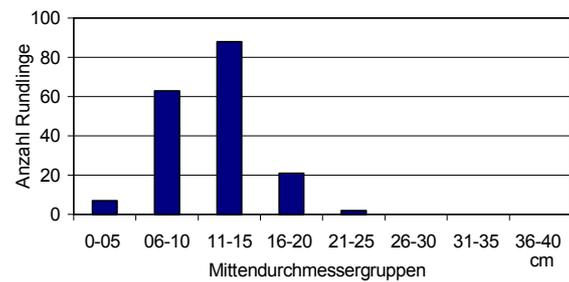
KS 3 (Fi; n=152; 11,9 cm)



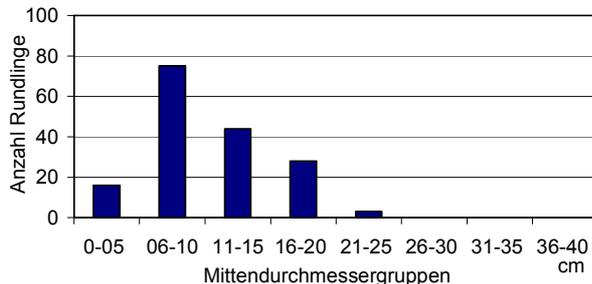
KS 4 (Bu; n=128; 12,9 cm)



KS 5 (Fi; n=182; 11,4 cm)



KS 6 (Bu; n=166; 10,5 cm)



Gesamt KS (Fi Bu; n=751; 12,3 cm)

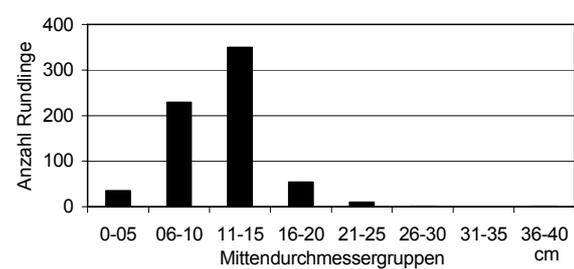


Abb. 42: Die Verteilung der Mittendurchmesser des Holzes in den Kleine-Senkrechtspalter(KS)-Studien. Grafiktitel mit Baumart, Anzahl Rundlingen und mittlerem Mittendurchmesser

Wenn die Arbeit am kleinen Senkrechtspalter optimal organisiert ist erreicht das eigentliche Spalten einen Anteil von bis zu 70% des gesamten Arbeitsablaufs, das zeigt die Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte der Teilstudie KS 3 in Abb. 43. Die restlichen 30% teilen sich die Arbeitsablaufabschnitte "Holz holen" und "Holz ablegen" zu ungefähr gleichen Teilen. Abweichungen davon spiegeln die unterschiedlichen Weglängen von bzw. zu den jeweiligen Holzlagern wider.

In den Teilstudien KS 1 und 2 wurde beim "Holz spalten" der Ablaufabschnitt "Zurechtrücken" extra notiert, wenn die Arbeitskraft Zeit damit verbrachte, für den Rundling die optimale Position für das Eindringen des Senkbeils zu finden und einen sicheren Halt zu bekommen. Dabei nimmt der Anteil für dieses "Zurechtrücken" in der Teilstudie KS 1 bei den gleichmäßig geformten Fichtenrundlingen 9% ein, wohingegen es bei der Teilstudie KS 2 bei den astigeren und unförmigeren Buchenrundlingen auf 18% anstieg, obwohl der mittlere Durchmesser der Rundlinge mit 13,4 cm

bei KS 1 und 13,7 cm bei KS 2 ähnlich war. In den übrigen Teilstudien wurde der Abschnitt "Zurechtrücken" nicht extra gemessen und ist im Abschnitt "Holz spalten" enthalten.

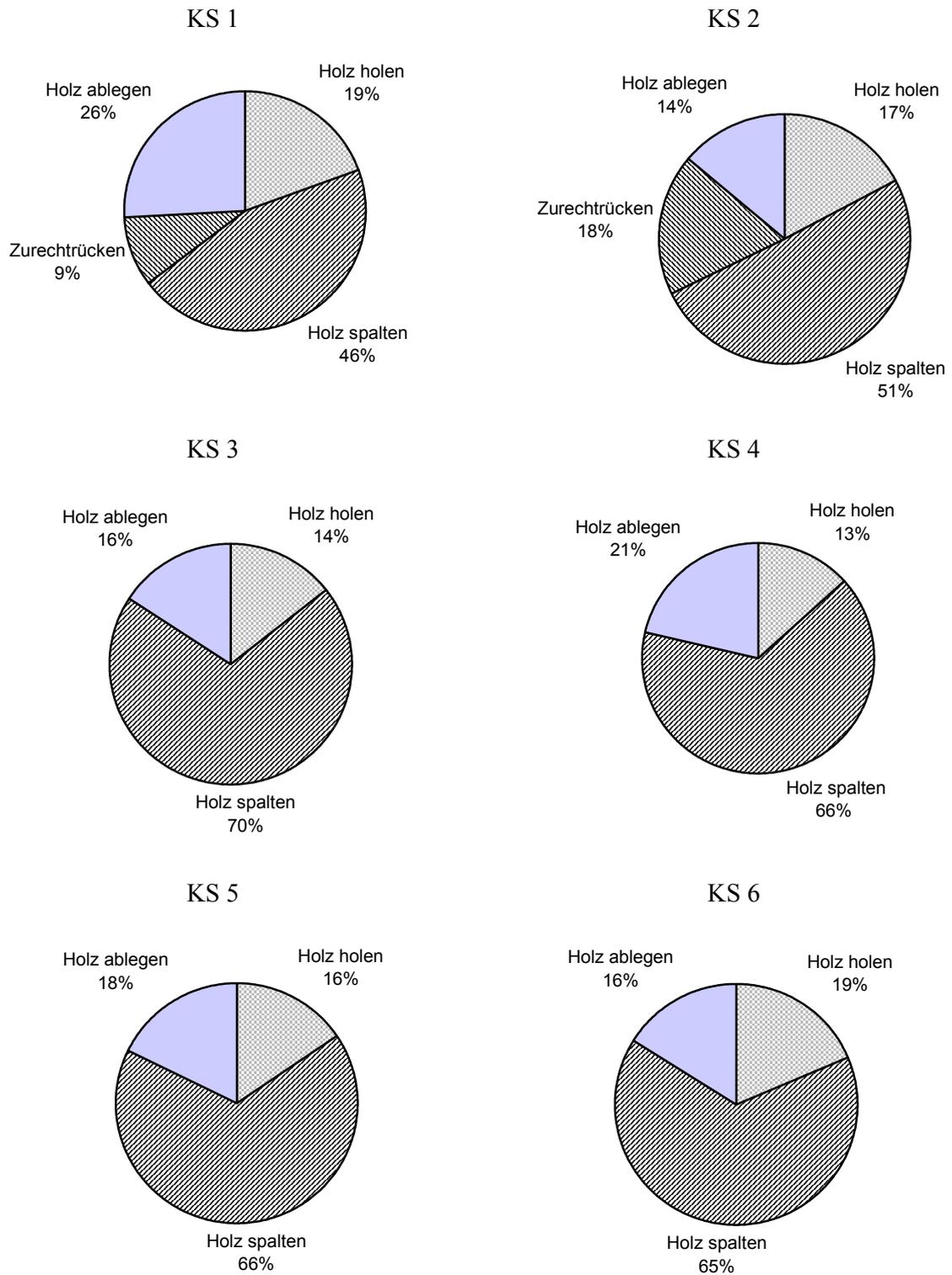


Abb. 43: Die zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den Kleine-Senkrechtspalter(KS)-Studien

Die Tatsache, dass das Volumen der Rundlinge durch Einzelmessungen vor dem Spalten festgestellt worden war, erlaubt weitergehende Auswertungen zu den Zeitstudien. In Abb. 44 (links) ist beispielsweise dargestellt, dass die Zyklusdauer, d. h. die Zeitsumme der Arbeitsablaufabschnitte "Holz holen", "Holz spalten" und "Holz ablegen", mit dem steigenden Mittendurchmesser – das heißt mit dem Rundlingsvolumen – ansteigt. Folgerichtig kam es nicht, wie ursprünglich erwartet, zu einem Anstieg der technischen Arbeitsproduktivität (TAP) mit steigendem Mittendurchmesser. Das verdeutlicht eine entsprechende Regressionsanalyse über die Durchmesser in allen Teilstudien, sie ergab hierfür einen nicht-signifikanten Zusammenhang mit einem Bestimmtheitsmaß von lediglich $R^2=0,08$ (Abb. 44, rechts). Dieses Ergebnis zeigt, dass sich die erschwerte Handhabbarkeit größerer Scheite hier offenbar so sehr zyklusverlängernd auswirkt, dass sich die Arbeitsleistung nicht weiter steigert. Hierin spiegelt sich auch der bei diesem Aufbereitungsverfahren immer noch hohe Handarbeitsanteil bzw. der relativ geringe Mechanisierungsgrad wider.

Zusätzlich lassen sich aus den Regressionsanalysen in Abb. 44 (rechts) noch weitere Erklärungen bzw. Ursachen für diesen fehlenden Zusammenhang ablesen. So ist die Streuung der "momentanen" technischen Arbeitsproduktivität (TAP) mit Werten bis 1,2 Fm/AKh bis zu einem Mittendurchmesser von 7 cm der Rundlinge zunächst vergleichsweise hoch, bei 8 cm wieder niedriger, aber bis 16 cm erneut ansteigend. Der Grund hierfür liegt in der Häufigkeit des Spaltens. Bis etwa 7 cm Mittendurchmesser wird häufig gar nicht gespalten, was eine sehr kurze Zyklusdauer und damit eine hohe TAP, selbst bei Rundlingen mit geringem Volumen, zur Folge hat. Bis etwa 16 cm Mittendurchmesser wird der Rundling dann einmal gespalten, somit ändert sich die Zykluszeit von 8 bis 16 cm kaum (Abb. 44, links). Da sich aber das bearbeitete Volumen vergrößert, steigt die TAP in dieser Spanne. Bei größeren Mittendurchmessern muss der Rundling dann mehr als einmal gespalten werden. Außerdem werden die Rundlinge zunehmend unhandlich, bereits gespaltene Teilstücke müssen neben dem Spalter vorübergehend abgelegt werden, um die Arbeitsfläche frei zu halten, wodurch die Zyklusdauer überproportional steigt und die TAP sinkt. Zusammenfassend lässt sich somit feststellen, dass beim Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter die Rundlinge mit 5 bis 7 cm (kein Spalten erforderlich) und etwa 16 cm Mittendurchmesser (nur einmal Spalten) die größten arbeitswirtschaftlichen Vorteile bieten.

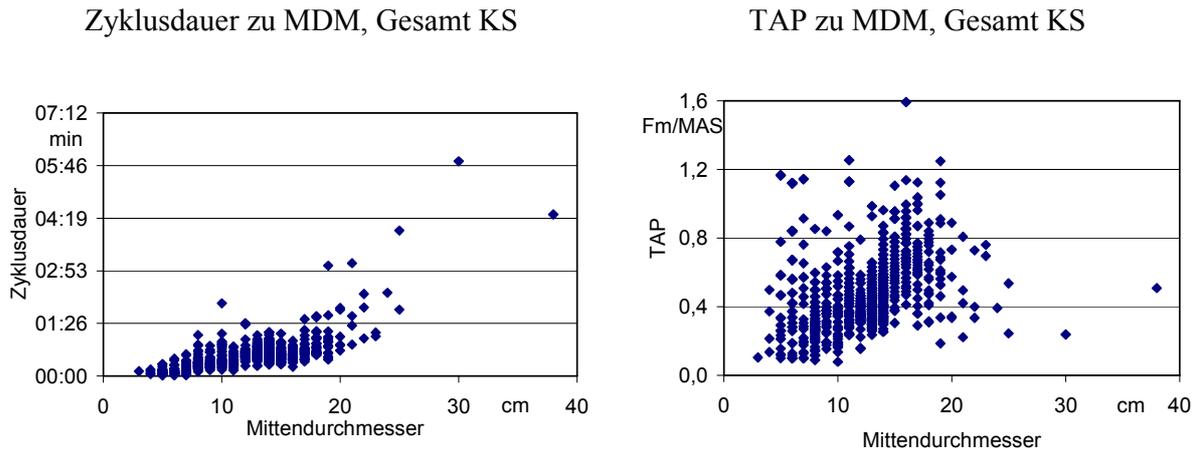


Abb. 44: *Zyklusdauer und technische Arbeitsproduktivität (TAP) in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser (MDM) der Rundlinge (Werte aus allen Kleine-Senkrechtspalter(KS)-Studien)*

Die gemessene Gesamtproduktivität in den Teilstudien zum kleinen Senkrechtspalter ist in Tab. 9 zusammengestellt. Der Mittelwert liegt bei 0,43 Fm/AKh, wobei systematische Unterschiede zwischen Buchen- und Fichtenholz nur schwer erkennbar sind, allenfalls lassen sich für Buchenholz mit 0,49 Fm/AKh im Durchschnitt leichte Produktivitätsvorteile gegenüber der Fichte mit durchschnittlich 0,38 Fm/AKh erkennen.

Im Mittel aber liegt die Arbeitsproduktivität beim Senkrechtspalten damit nicht höher als beim Einsatz eines Spalthammers mit Fichtenrundlingen (vgl. Kapitel 5.1.3.1). Allerdings erscheint es zulässig, dass die Produktivität des Senkrechtspaltens – im Gegensatz zur Axt- oder Spalthammerarbeit – durchaus auch über einen längeren Zeitraum angesetzt werden kann (keine Pause nach 1 Stunde), wengleich die Daten hier noch keine gezielte Auswertung zur Ermüdung des Bedienpersonals ermöglichen. Als Fazit bleibt aber festzuhalten, dass der Einsatz des kleinen Senkrechtspalters im Vergleich zur Axt- und Spalthammerarbeit primär einer dauerhaften Produktivitätssteigerung dient. Außerdem tritt eine Arbeitserleichterung ein (vgl. hierzu Kapitel 5.2.2.2).

Tab. 9: Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) und mittlere Zyklusdauer in den Kleinen-Senkrechtspalter(KS)-Studien. Eine Arbeitskraftstunde AKh entspricht hier einer Maschinenarbeitsstunde MAS

Teilstudie	Baumart	mittlere Zyklusdauer [s]	TAP [Fm/AKh] ^a	TAP [Rm/AKh] ^b
KS 1	Fichte	43,9	0,23	0,36
KS 2	Buche	80,6	0,47	0,76
KS 3	Fichte	28,4	0,50	0,78
KS 4	Buche	30,4	0,59	0,95
KS 5	Fichte	33,9	0,40	0,62
KS 6	Buche	21,4	0,40	0,64
Mittelwert		39,8	0,43	0,69

^a Berechnung: Gesamtholzmenge je Arbeitskraftstunde (AKh), berechnet aus der Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten

^b Umrechnung von Fm zu Rm nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.8.1); hier: Rm mit 33 cm Scheiten, gestapelt

5.1.3.3 Spalten mit großem Senkrechtspalter

Auch beim Spalten mit dem großen Senkrechtspalter (GS) wird oft nur eine einzelne Arbeitskraft benötigt, das war zum Teil auch in den hier durchgeführten Teilstudien der Fall. In drei Fällen (GS 4, 5 und 6) kam es aber auch zur Mitarbeit einer weiteren Person. Bei den Probanden handelte es sich um den oben beschriebenen jungen Diplom Forstwirt, der selten mit dem großen Senkrechtspalter spaltet und daher bei diesem Gerät eher als Laie einzustufen ist, bzw. um einen jungen Landwirt, der regelmäßig mit dem Senkrechtspalter umgeht sowie um einen Brennholzhändler, der sehr oft mit einem Senkrechtspalter spaltet und daher als Profi einzustufen ist. In den Teilstudien wurde das Spalten von insgesamt 1019 Rundlingen mit 1 m Länge der Baumarten Buche (*Fagus sylvatica*) und Fichte (*Picea abies*) über eine Dauer von insgesamt 12:31 h untersucht (zu den Holzarten der Teilstudien siehe Tab. 10), wobei drei verschiedene Spalterfabrikate eingesetzt wurden. Die Maschinen und Rahmenbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 10.1 zusammengestellt.



Abb. 45: *Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit großem Senkrechtspalter (hier: Spaltbrummi, Fa. Vogesenblitz)*

Als Ausgangsmaterial wurden Rundlinge mit einem mittleren Mittendurchmesser von 20,1 cm verwendet. Wie erwartet kam es hier im Vergleich zum kleinen Senkrechtspalter zu einer Verschiebung hin zu größeren Durchmessern, im Mittel beträgt diese Zunahme 7,7 cm. Besonders große Durchmesser lagen beim Sortiment der Teilstudie GS 5 vor (Abb. 46), hier wurde Holz von ca. 60-jährigen Bäumen ab einem Zopfdurchmesser von 8 cm vollständig zu Brennholz verarbeitet. Dennoch sind die meisten Rundlinge der Mittendurchmesserklasse von 16 bis 20 cm zuzuordnen, gefolgt von der Klasse 11 bis 15 cm (Abb. 46, Gesamt GS). Die schiefe Durchmesserverteilung ist dabei typisch, jeder Baum verjüngt seinen Stamm mit zunehmender Höhe, so dass bei den Meter-Rundlingen kleine Mittendurchmesser immer vorkommen, größere jedoch nur bei älteren Bäumen. Außerdem werden Sortimente mit kleinen Mittendurchmessern für die Brennholznutzung bevorzugt, während größere Sortimente als Nutzholz höhere Einnahmen erzielen.

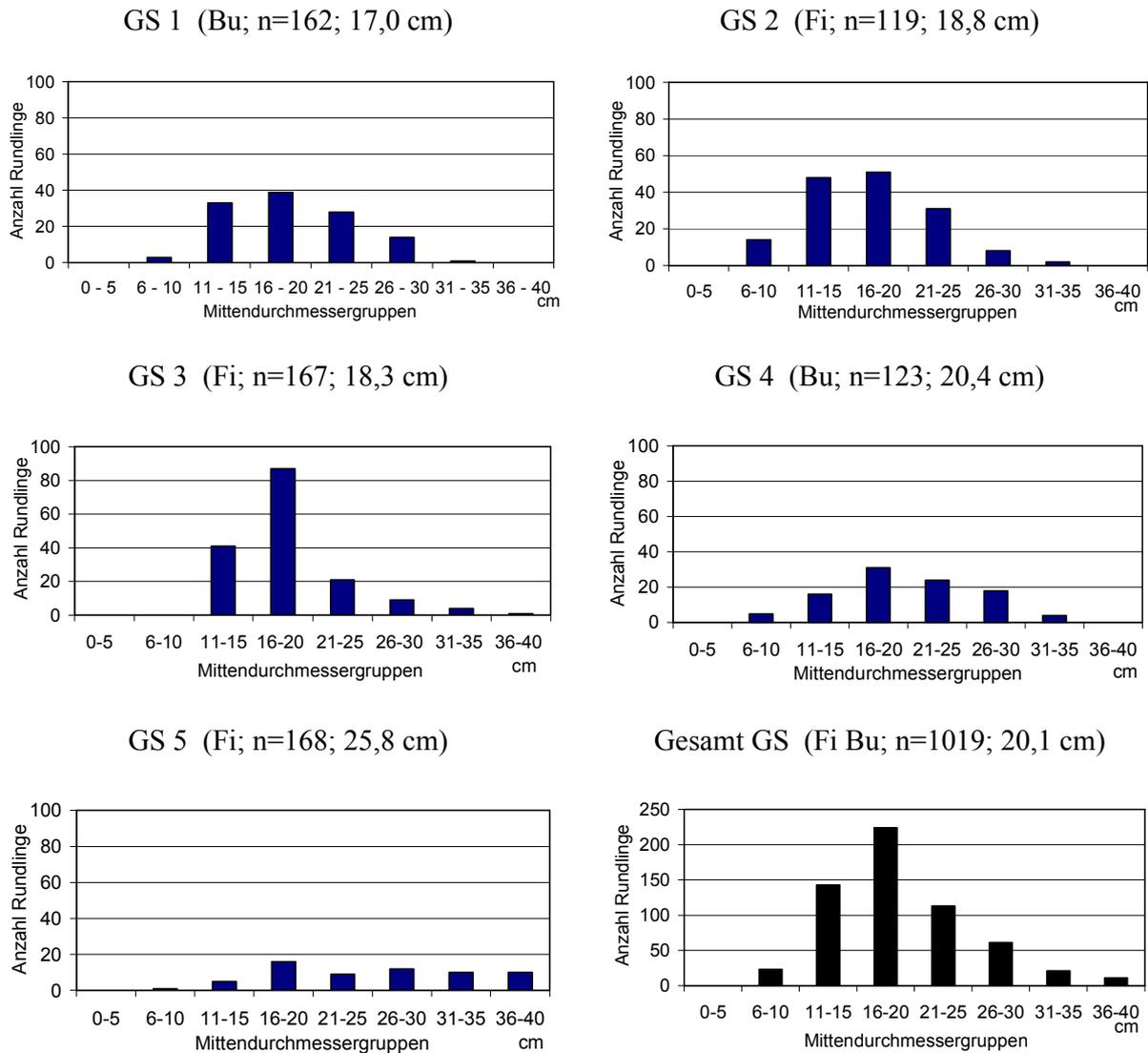


Abb. 46: Die Verteilung der Mittendurchmesser des Holzes in den Große-Senkrechtspalter(GS)-Studien. Grafiktitel mit Baumart, Anzahl Rundlingen und mittlerem Mittendurchmesser. Teilstudie GS 6 nicht dargestellt (keine Einzelvolumenbestimmung)

Wie bei der Studie zum kleinen Senkrechtspalter ist die Gestaltung des Arbeitsplatzes optimal, wenn, wie in der Teilstudie GS 3 (Abb. 47), 70% der Arbeitsablaufabschnittsanteile auf das Spalten und der Rest gleichmäßig auf "Holz holen" und "Holz ablegen" verteilt sind. Allerdings ist die Arbeit offenbar relativ anstrengend, denn der gleiche Proband, der bereits in den Studien zum kleinen Senkrechtspalter (KS) beobachtet wurde, musste bei den Teilstudien GS 1 und GS 2 kleine Erholungspausen einlegen (PVZ, persönliche Verteilzeit); dies war beim kleinen Senkrechtspalter nicht der Fall. In den Teilstudien GS 1 und 2 war die Gestaltung des Arbeitsplatzes nicht optimal, die beiden Lagerplätze für das Buchenholz in GS 1 waren vom Spalter zu weit entfernt; durch häufigeres Versetzen des Schleppers mit Spalter hätte viel Zeit eingespart werden können.

Bei den Teilstudien GS 4 und GS 5 waren zwei Arbeitskräfte im Einsatz. Speziell bei GS 5 wurde das Holz vom Probanden nur neben den Spalter fallen gelassen, von wo es der Helfer aufnahm

und stapelte. Daraus erklärt sich der nur 7%-ige Zeitanteil für "Holz ablegen", denn die Verteilung gibt ausschließlich Auskunft über die Arbeit am Spalter. In den drei Teilstudien GS 3 bis GS 5 wurde der Abschnitt "Zurechtrücken" nicht separat erfasst. Er ist im Abschnitt "Spalten" enthalten. In den GS-Studien waren die Probanden so geübt, dass nur sehr wenig zurechtgerückt wurde.

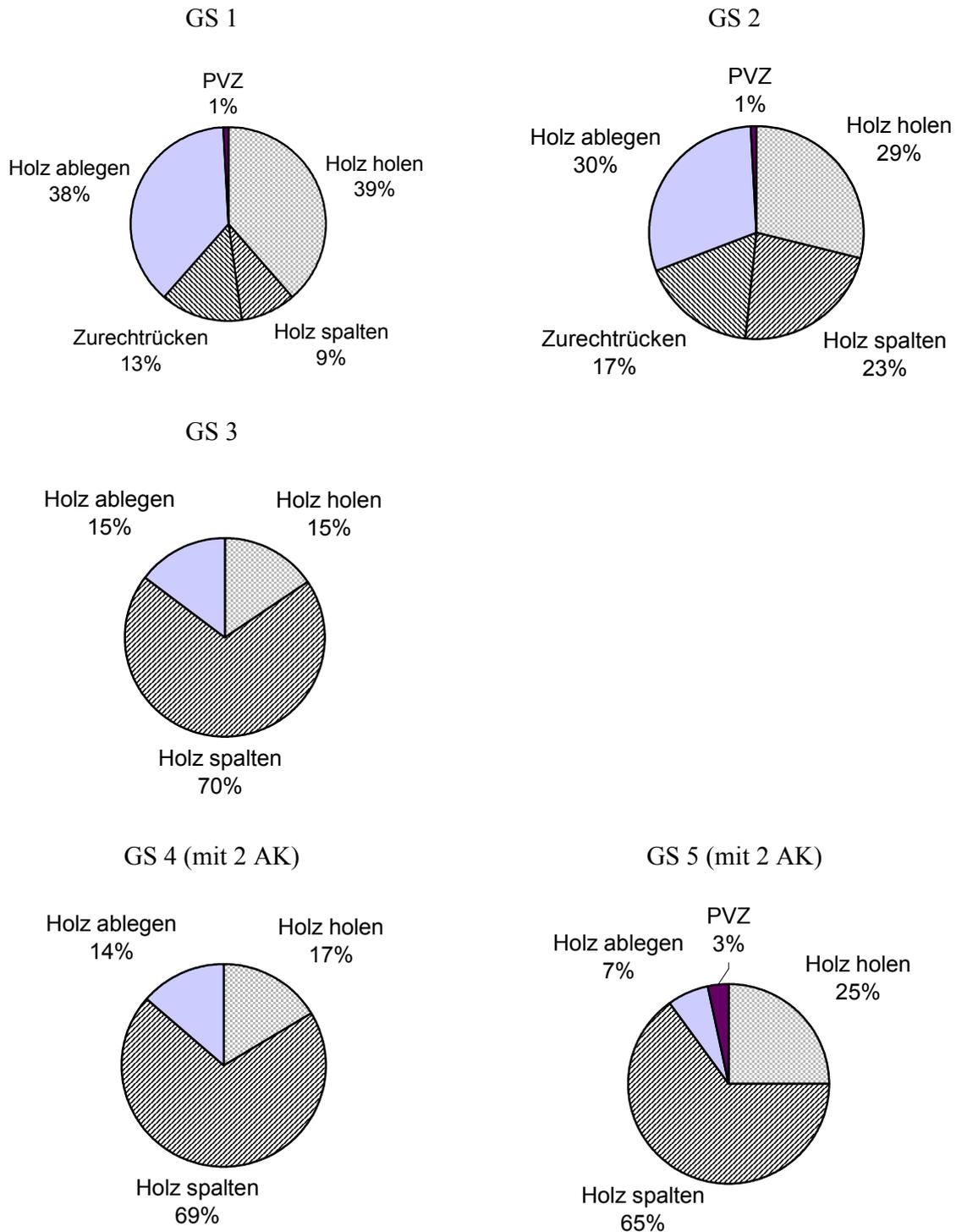


Abb. 47: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den Große-Senkrechtspalter(GS)-Studien. Teilstudie GS 6 nicht dargestellt (keine einzelnen Ablaufabschnitte gemessen). AK Arbeitskräfte

Die Messung der Einzelvolumina der Rundlinge ermöglicht auch hier die Betrachtung der Zykluszeiten in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser des Holzes (Abb. 48). Mit Ausnahme der Teilstudien GS 1 und 2, in denen das Bestimmtheitsmaß mit $R^2=0,22$ relativ niedrig ist, zeigt sich bei den übrigen Teilstudien hierfür ein klarer Zusammenhang. In den Studien GS 1 und 2 war anstelle

des sonst üblichen Senkbeils ein Senkkreuz verwendet worden, folglich erhöht sich die Zyklusdauer bei steigendem Durchmesser nur unerheblich, da mit dem Senkkreuz auch dickere Rundlinge in nur einem Arbeitsgang gespalten werden konnten.

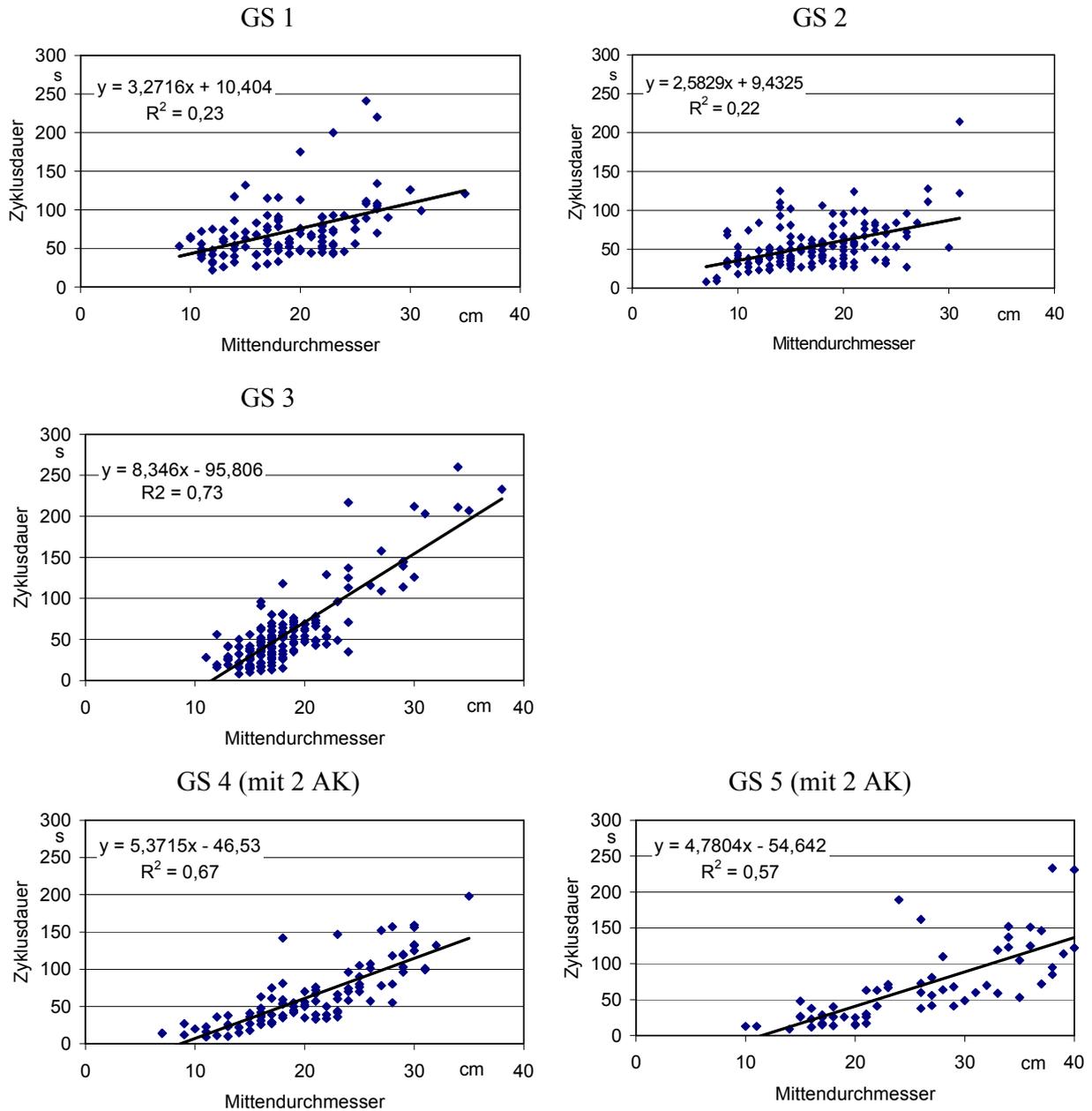


Abb. 48: Zyklusdauer in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge bei den Große-Senkrechtspalter(GS)-Studien. Teilstudie GS 6 nicht dargestellt (keine einzelnen Ablaufabschnitte gemessen)

Wie beim kleinen Senkrechtspalter (Kapitel 5.1.3.2) ist auch beim großen Senkrechtspalter meist kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der "momentanen" technischen Arbeitsproduktivität (TAP) und dem Mittendurchmesser der Rundlinge zu erkennen (Abb. 49). Lediglich in den Teilstudien GS 1 und GS 2 zeigt sich wegen der etwas größeren Konstanz der Zykluszeiten eine leichte Korrelation, das Bestimmtheitsmaß ist aber mit maximal $R^2=0,42$ nicht sehr hoch.

Eine Bestimmung des idealen Mittendurchmessers für Rundlinge ist für den großen Senkrechtpalter nicht möglich. Stattdessen muss hierfür eine Bandbreite angegeben werden; sie liegt bei ca. 15 bis 25 cm, in diesem Bereich wurden in den Versuchen die höchsten Stundenleistungen erzielt. Bei Verwendung eines Spalters mit Senkkreuz (Teilstudien GS 1 und GS 2) ist die höchste momentane Produktivität am oberen Ende dieser Bandbreite zu erwarten (Abb. 49).

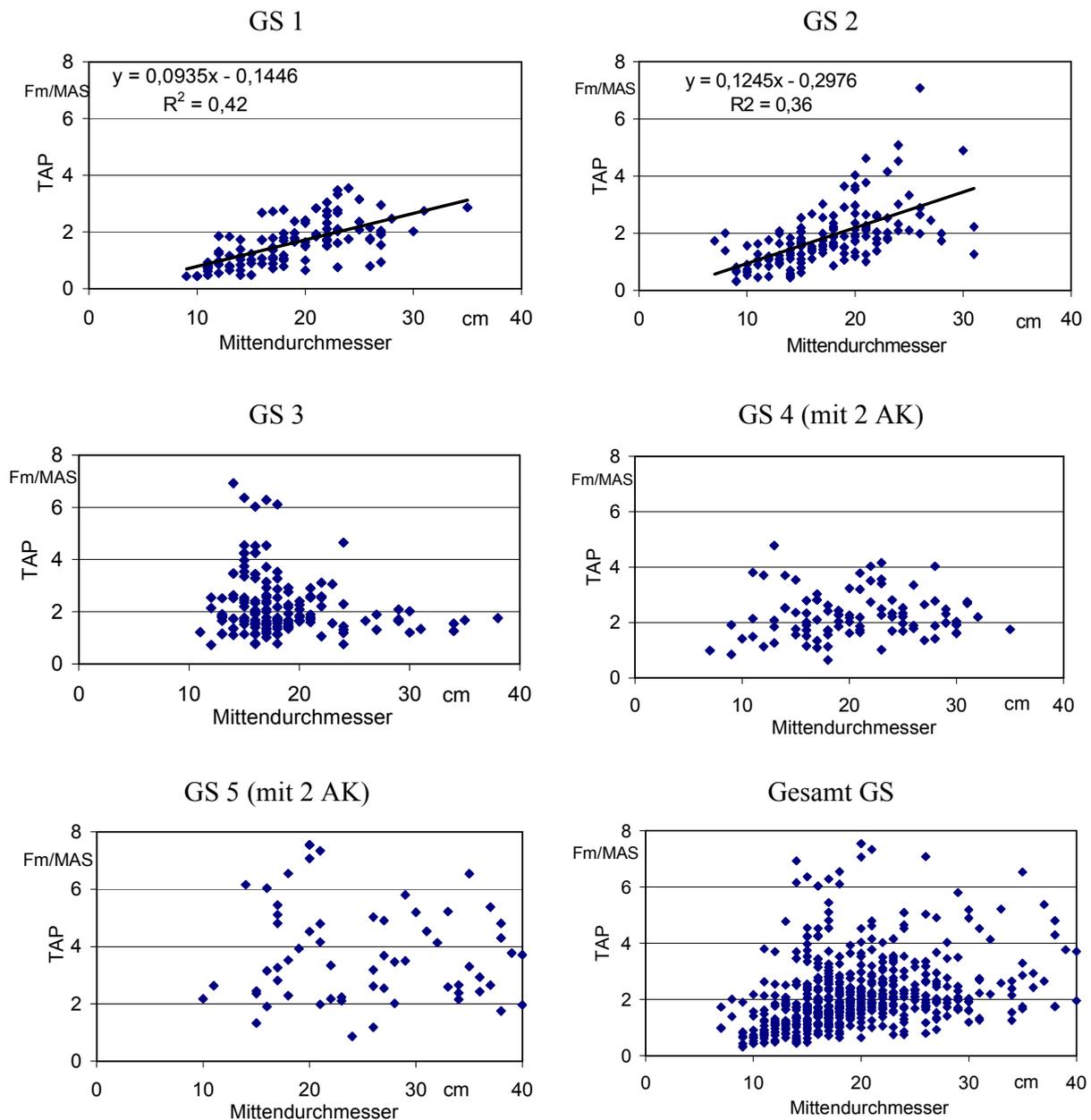


Abb. 49: Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je Maschinenstunde beim Einsatz des großen Senkrechtpalters in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge.
AK Arbeitskräfte

Die gemessene Gesamtproduktivität in den einzelnen Teilstudien zum großen Senkrechtpalter (GS) ist in Tab. 10 zusammengestellt. Gegenüber den Arbeiten mit dem kleinen Senkrechtpalter

(Kapitel 5.1.3.2) steigt hier die mittlere Produktivität deutlich auf einen Durchschnittswert von 2,8 Rm/AKh. Hier wirken sich das insgesamt größere Arbeitsgerät und vor allem die große Scheitlänge vorteilhaft aus. Allerdings muss das nunmehr gespaltene Meterholz meist noch weiter zu ofenfertigen Kurzscheiten zerkleinert werden, daher sind die beiden Prozesse nicht ohne weiteres direkt miteinander vergleichbar.

Tab. 10: Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) je Arbeitskraftstunde und mittlere Zyklusdauer in den Großen-Senkrechtspalter(GS)-Studien. Berechnung der TAP je Maschinenarbeitsstunde MAS bzw. Arbeitskraftstunde AKh aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit (GAZ). n.b.: nicht bestimmt

Teil-studie	Baumart	Mittlere Zyklusdauer [s]	Technische Arbeitsproduktivität (TAP)			
			des Maschineneinsatzes		des Arbeitskräfteeinsatzes	
			TAP [Fm/MAS]	TAP [Rm/MAS]	TAP [Fm/AKh] ^a	TAP [Rm/AKh] ^b
GS 1	Buche	54,5	1,7	3,4	1,7	3,4
GS 2	Fichte	70,0	1,6	2,9	1,6	2,9
GS 3	Fichte	57,7	1,8	3,2	1,8	3,2
GS 4	Buche	62,9	2,1	4,2	1,1 ^c	2,1 ^c
GS 5	Fichte	67,3	3,1	5,6	1,6 ^c	2,8 ^c
GS 6 ^d	Gemischt	n.b.	2,3	4,3	1,2 ^c	2,2 ^c
Mittelwert		62,5	2,1	3,9	1,5	2,8

^a Berechnung: Gesamtholzmenge je Arbeitskraftstunde (AKh), berechnet aus der Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten

^b Umrechnung von Fm zu Rm nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.8.1); hier: Rm mit 33 cm Scheiten gestapelt

^c Hier waren zwei Arbeitskräfte (AK) eingesetzt worden, die TAP wurde auf 1 AKh umgerechnet.

^d Hier wurden nur die Gesamtarbeitszeit und das Gesamtholzvolumen bestimmt (keine Zyklen bzw. Einzelvolumina). Die Holzvolumenbestimmung erfolgte in den Stapelversuchen zu Kapitel 5.8.1

5.1.3.4 Spalten großem Waagrechtspalter

Beim Spalten mit dem großen Waagrechtspalter (WS) (Abb. 50) arbeiten in der Regel zwei Personen an einem Gerät; ein Maschinist und ein Zubringer. Auch die vorliegenden Messungen wurden so durchgeführt. Bei den Probanden handelte es sich zum einen um einen Landwirt, der regelmäßig mit Waagrechtspaltern arbeitet und daher als professionell einzustufen ist (WS 3) und zum anderen um einen pensionierten Landwirt, der aufgrund seines Alters als semi-professionell eingestuft wird (WS 1 und 2). Die Studie wurde in drei Teilstudien WS 1 bis 3 durchgeführt, darin erfolgte das Spalten von insgesamt 509 Rundlingen der Baumart Fichte (*Picea abies*) mit je 1 m Länge über eine Gesamtdauer von insgesamt 05:44 h. Es wurden zwei verschiedene Geräte untersucht. Die Maschinen und Rahmenbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 10.1 zusammengestellt.



Abb. 50: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit großem Waagrechtspalter (hier: Hydromax 24 t, Fa. Posch)

Der mittlere Mittendurchmesser bei den Studien WS 1 bis 3 ist mit 20,4 cm ähnlich dem der Studien zum großen Senkrechtspalter (GS) mit 20,1 cm. Bei den einzelnen Mittendurchmessern sind hier jedoch die Klassen 11 bis 15 cm gefolgt von 16 bis 20 cm am häufigsten vertreten (vgl. Abb. 51; Gesamt WS). Allerdings werden auch vereinzelt sehr starke Sortimente verarbeitet, das zeigt die Größenverteilung zur Studie WS 3 mit einem mittleren Mittendurchmesser von 29,3 cm.

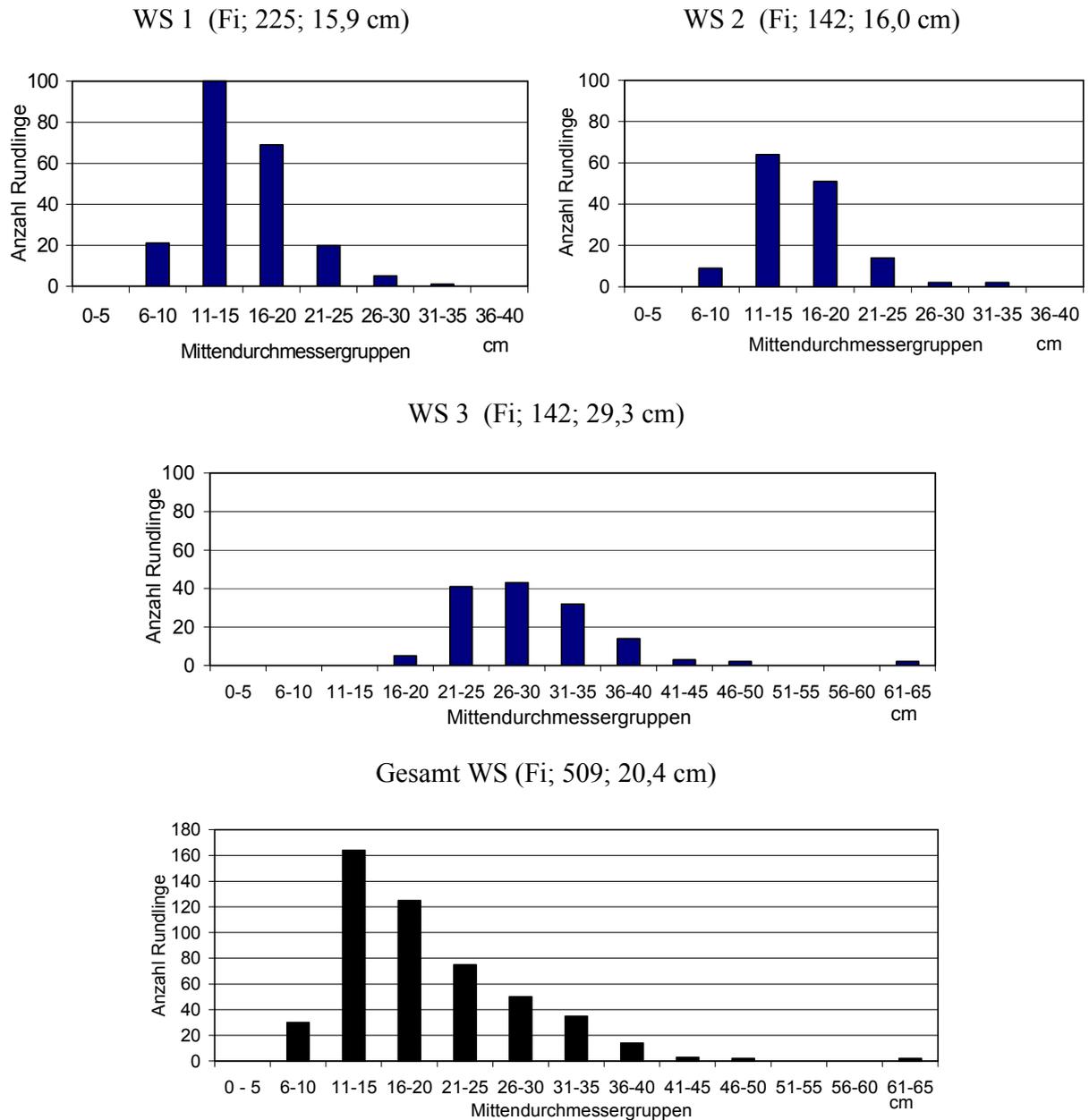


Abb. 51: Die Verteilung der Mittendurchmesser des Holzes in den Waagrechtspalter(WS)-Studien. Grafiktitel mit Baumart, Anzahl Rundlingen und mittlerem Mittendurchmesser

Die Zeitanteile der gemessenen Arbeitsablaufabschnitte sind in Abb. 52 dargestellt. Allerdings lassen sich die Teilstudien nicht ohne weiteres direkt miteinander vergleichen. In der Teilstudie WS 1 wurden die Handlungen der Arbeitskraft festgehalten, während in Teilstudie WS 2 und WS 3 die Bewegungen des Spalters aufgezeichnet wurde, wobei es sich aber in den Studien WS 1 und WS 2 um die gleiche Spaltvorrichtung handelte. Der Arbeitsablaufabschnitt "Holz ablegen" kam in keiner Teilstudie vor, denn bei WS 1 und 2 fiel das gespaltene Holz nach dem Spaltvorgang einfach zu Boden, während es bei WS 3 von einer Arbeitskraft abgenommen und sofort gestapelt wurde. Das Spaltkreuz kann bei Waagrechtspaltern auf den Mittelpunkt des Rundlingsquerschnitts justiert werden, um gleichmäßige Scheitstärken zu erhalten. Dieser Vorgang lief häufig so rasch und zeitgleich mit der ersten Vorwärtsbewegung des Stempels ab, dass eine Zeitauf-

nahme schwierig war. Des weiteren wurde die Hebevorrichtung nur bei Rundlingen mit größerem Durchmesser benutzt, denn in der Regel legten die Probanden die Rundlinge direkt von Hand in die Wanne vor den noch in Rückwärtsbewegung befindlichen Stempel. Allgemein ist für das Spalten mit dem großen Waagrechtspalter festzuhalten, dass ein Optimum erreicht ist, wenn ca. 70% der Gesamtzeit auf den Spaltvorgang entfallen.

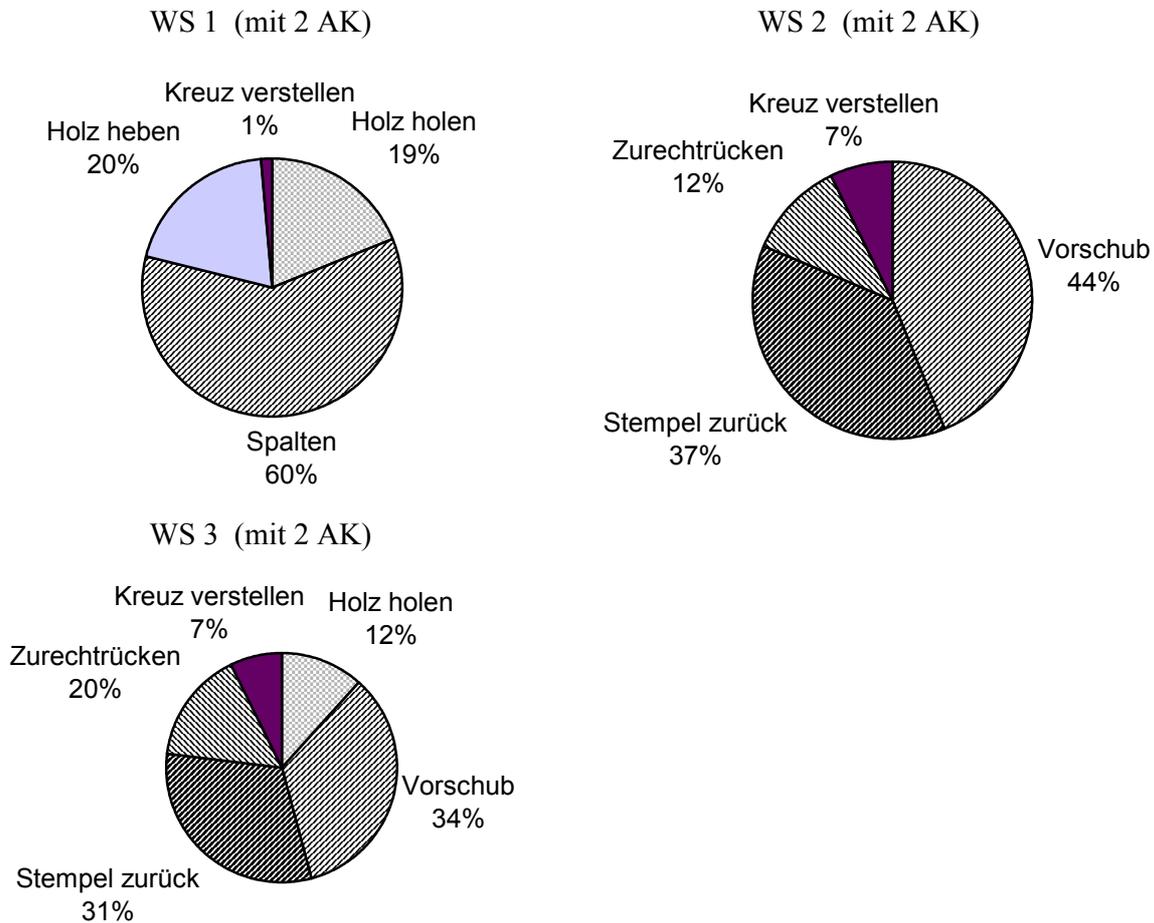


Abb. 52: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den Waagrechtspalter(WS)-Studien. AK Arbeitskräfte

Bis zu einem Mittendurchmesser der Rundlinge von 35 cm liegt die Zyklusdauer beim Waagrechtspalter relativ konstant bei ca. 30 Sekunden (Abb. 53). Bei größeren Rundlingen steigt die Verarbeitungszeit je Rundling an, sie kann in der Spitze bei einem Mittendurchmesser von 65 cm über 7 Minuten betragen. Über die gesamte Untersuchung (Abb. 53, gesamt WS) lässt sich der Verlauf in drei Abschnitte aufteilen. Von 8 bis 25 cm Mittendurchmesser ist die Zyklusdauer konstant, von 25 cm bis 35 cm steigt sie leicht und von 35 bis 65 cm stark an.

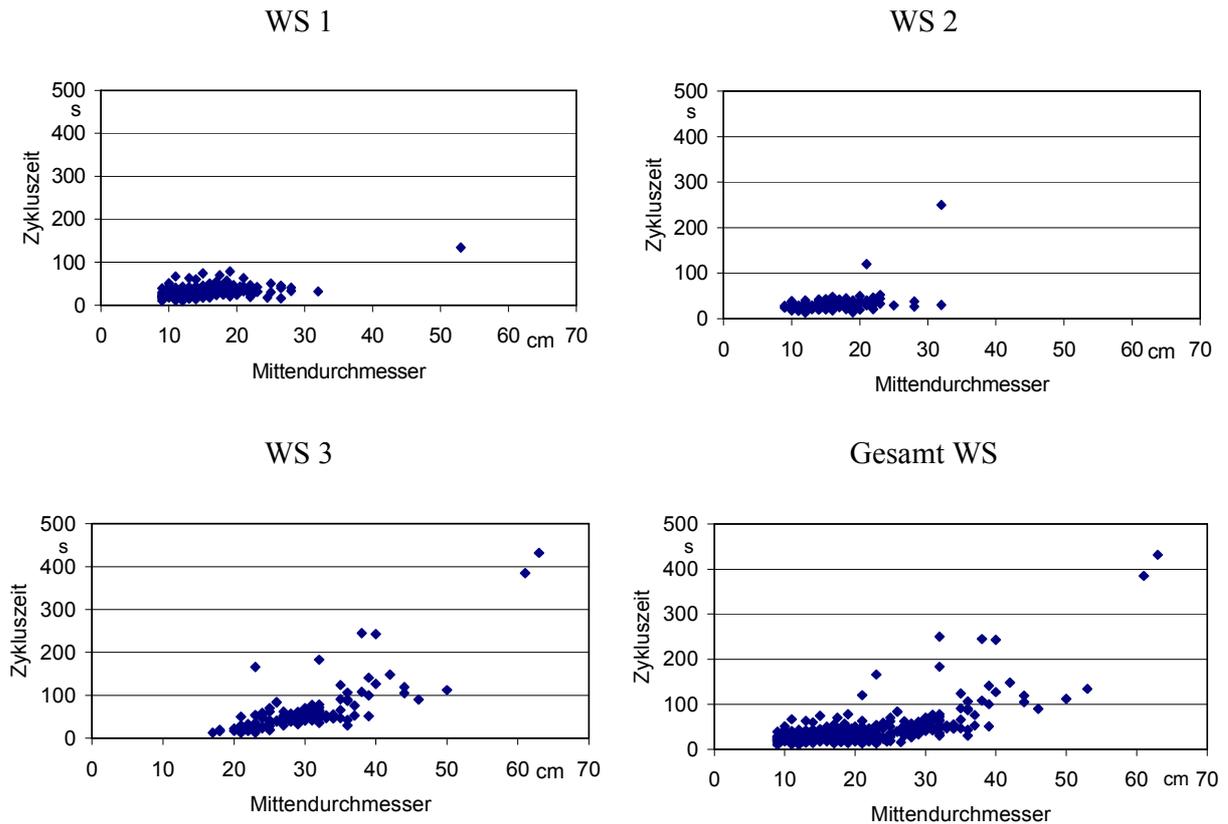


Abb. 53: *Zyklusdauer in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge bei den Waagrechtspalter(WS)-Studien*

Aus den Ergebnissen zu den Zykluszeiten (Abb. 54, Gesamt WS) lässt sich schließen, dass die optimale Holzstärke für den Waagrechtspalter bei einem Mittendurchmesser von ca. 30 cm liegt. Damit kann die "momentane" Produktivität der Maschine auf durchschnittlich 5 Fm/MAS ansteigen. Bis zu einem Mittendurchmesser von 20 cm steigt die Produktivität konstant an (von ca. 1 bis 3 Fm/MAS). In zwei von drei Teilstudien kam es danach zu einem deutlich verstärkten Anstieg bis zu einem Mittendurchmesser von 32 cm, wobei Durchsatzleistungen von bis 12 Fm/MAS erzielt wurden (Abb. 54). Deutlich stärkere Rundlinge mit bis zu 65 cm Durchmesser führen dann aber wieder zu einer sinkenden Produktivität. Bei Häufung derartiger Holzstärken ist es daher empfehlenswert, entsprechend leistungsstärkere Geräte einzusetzen.

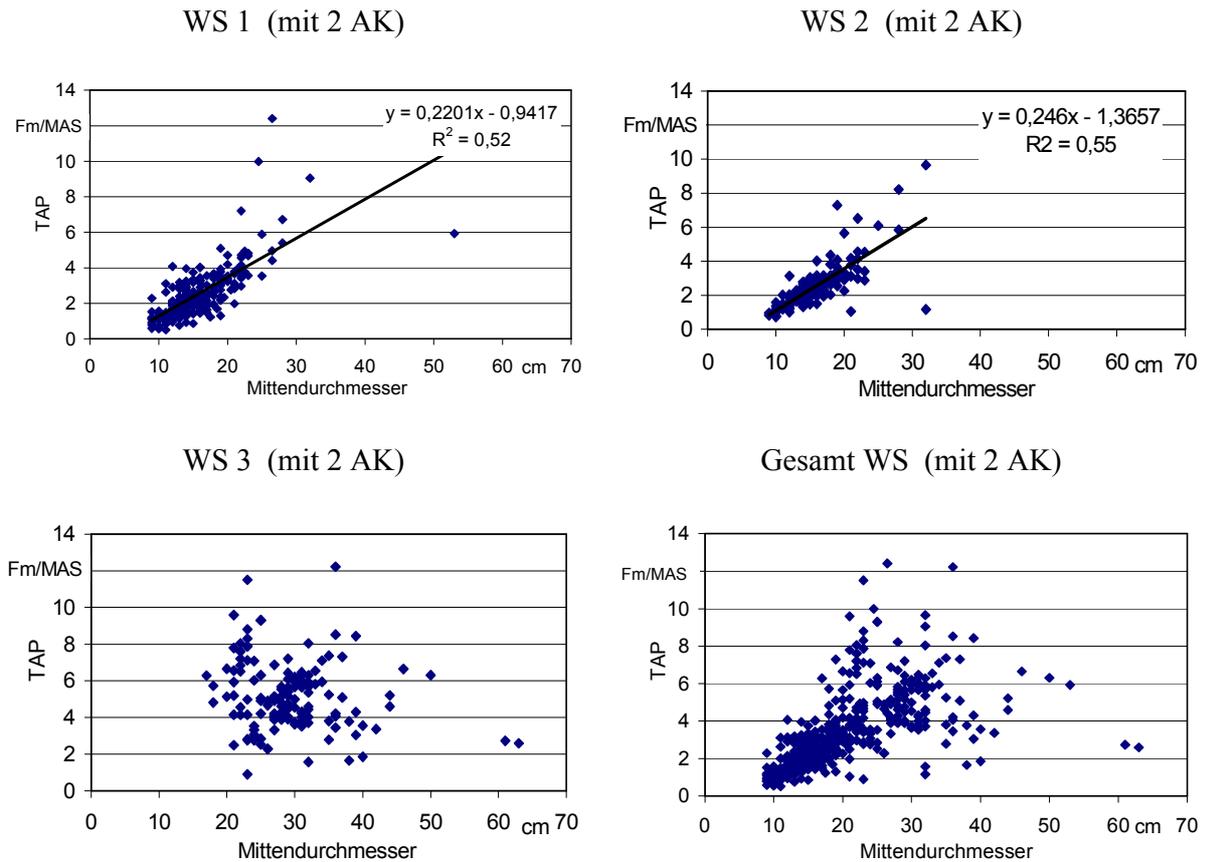


Abb. 54: Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je Maschinenstunde beim Einsatz des Waagrechtspalters (WS) in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge AK Arbeitskräfte

Die gemessene mittlere technische Arbeitsproduktivität (TAP) bezogen auf die Maschinen- bzw. Arbeitskraftstunde ist für die einzelnen Teilstudien in Tab. 11 dargestellt. Während die Maschinenleistung gegenüber dem großen Senkrechtspalter von 3,9 auf 5,3 Rm/MAS steigt, zeigt sich bei der Produktivität des Arbeitskräfteeinsatzes keine Veränderung, sie ist mit 2,8 (GS-Studie) und 2,7 Rm/AKh (WS-Studie) weitgehend konstant.

Tab. 11: Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschinen- und Arbeitskräfteeinsatzes und mittlere Zyklusdauer in den Waagrechtspalter(WS)-Studien. Berechnung aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten

Teil-studie	Baum-art	Mittlere Zyklusdauer [s]	Technische Arbeitsproduktivität (TAP)			
			des Maschineneinsatzes		des Arbeitskräfteeinsatzes	
			TAP [Fm/MAS]	TAP [Rm/MAS] ^a	TAP [Fm/AKh] ^b	TAP [Rm/AKh] ^{a, b}
WS 1	Fichte	31,7	2,4	4,3	1,2	2,2
WS 2	Fichte	31,9	2,4	4,3	1,2	2,2
WS 3	Fichte	60,0	4,0	7,2	2,0	3,6
Mittelwert		41,2	2,9	5,3	1,5	2,7

^a Umrechnung von Fm zu Rm nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.8.1); hier: Rm mit 33 cm Scheiten, gestapelt

^b Hier waren zwei Arbeitskräfte (AK) eingesetzt worden, die TAP wurde auf 1 AKh umgerechnet.

5.1.3.5 Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine

Beim Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK) arbeiten häufig zwei Personen an einem Gerät; ein Maschinist und ein Zubringer (Abb. 55). Auch die vorliegenden Messungen wurden zum Teil so durchgeführt. Bei den Probanden handelte es sich um Laien (KK 3 bis 5), eine semi-professionell (KK 1) und einen professionell (KK 2) arbeitenden Probanden.



Abb. 55: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK). Hier: Spaltfix 300, Fa. Posch

In fünf Teilstudien KK 1 bis KK 5 wurde das gleichzeitige Ablängen und Spalten zu 33 cm Scheiten von insgesamt 494 Rundhölzern der Baumart Fichte (*Picea abies*), Esche (*Fraxinus excelsior*) und Buche (*Fagus sylvatica*) mit der durchschnittlichen Länge von 2,9 m über insgesamt 9:24 h untersucht, dabei kamen drei verschiedene Geräte zum Einsatz. Die Maschinen und Rahmenbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 10.1 zusammengestellt.

Die Durchmesservertelung der verwendeten Rundlinge zeigt Abb. 56. Das am häufigsten verwendete Sortiment findet sich demnach in der Gruppe von 11 bis 15 cm Mittendurchmesser. Der Mittelwert von 15,2 cm liegt damit zwischen den Durchmessern der kleinen Senkrechtpalter-Studie mit 12,3 cm und dem der Großen-Senkrechtpalterstudie mit 20,1 cm. Der maximal mögliche Spaltdurchmesser wird für die eingesetzten Maschinen mit 30 cm bzw. 35 cm angegeben, jedoch wurde diese Holzstärke lediglich im Fall der Teilstudie KK 3 erreicht. Eher schwache Rundlinge kamen dagegen in der Studie KK 5 zum Einsatz, hier war die Durchmesserklasse von 6 bis 10 cm am häufigsten vertreten.

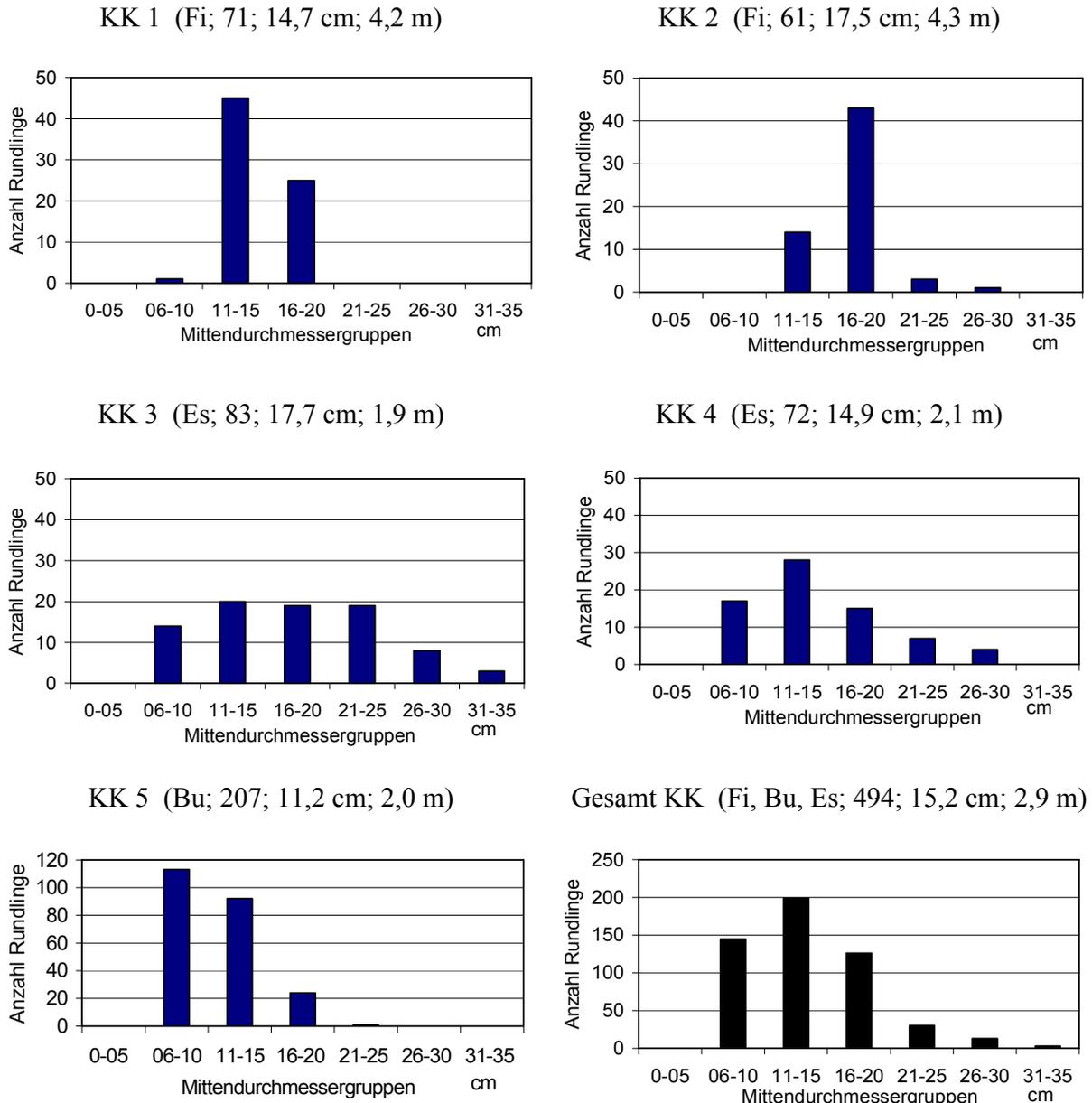


Abb. 56: Verteilung der Mitteldurchmesser des Holzes in den Teilstudien zur kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK). Grafiktitel mit Baumart, Anzahl Rundhölzer, mittlerem Mitteldurchmesser und mittlerer Länge

In der gemessenen Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte (Abb. 57) tritt hier der Abschnitt "Störung" erstmalig auf, er weist einen Anteil von 1 bis 8% auf. Eine Störung bedeutet eine Unterbrechung des Arbeitsvorganges und erfordert eine Behebung durch die Bedienperson. Meist handelt es sich dabei um das Verklemmen des Sägeblattes oder das Einklemmen von Holz im Spaltkreuz. Durch das Verwenden von gleichförmigem Ausgangsmaterial und durch zunehmende Erfahrung des Maschinenführers kann der Störungsanteil auf ca. 1% des gesamten Arbeitsablaufes reduziert werden (vgl. Teilstudie KK 2 in Abb. 57). Das typische Sortiment im Brennholzbereich ist jedoch normalerweise eher von minderer Qualität, so dass mit dem in der KK-Studie ermittelten durchschnittlichen Anteil von 4,8% Störung bei diesen Maschinen gerechnet werden muss. Hinzu kommen maschinelle Verteilzeiten, wie z. B. – je nach Maschinentyp – das Wechseln der Säge-

kette oder das Schärfen des Sägeblattes. Diese Zeiten traten aber bei diesen Aufnahmen wegen der Aufnahmelänge von maximal zwei Arbeitstagen nicht in Erscheinung.

Bei der Teilstudie KK 1 ist unter dem Arbeitsablaufabschnitt "Sonstiges" das Wechseln der Lagerbehälter (z. B. Kisten, Gitterboxen oder ein Anhänger) oder das Beibringen entfernt liegender Rundhölzer gemeint. "Extra Spalten" wurde vom Aufnehmer bei den Teilstudien KK 3 und KK 4 immer dann notiert, wenn die Arbeitskraft vom Bedienpult hin zum Spalten lief, um dort entweder das Holz zurechtzurücken oder es wegen des schon auf 33 cm gekürzten Ausgangmaterials direkt nur von der Seite vor den Stempel einzulegen, um ohne Sägen zu Spalten. Dies wurde hauptsächlich mit Rundlingen größerer Durchmesser durchgeführt. Bei einer Optimierung des gesamten Arbeitsablaufes sollte dieser Vorgang jedoch vermieden werden, so dass zu den Teilstudien KK 3 und KK 4 ein großes Potential zur Verbesserung der Arbeitsabläufe und zur der Steigerung der technischen Arbeitsproduktivität besteht. Dagegen war die Arbeitsgestaltung in Teilstudie KK 2 als optimal anzusehen, denn 94% des Arbeitsablaufs diente mit "Sägen" und "Vorschub" direkt der Scheitholzproduktion (Abb. 57).

Das Fördern des Rundholzes wurde zum großen Teil parallel zur Bearbeitung des vorherigen Holzes durchgeführt, so dass es nur dann notiert wurde wenn die Arbeitskraft ausschließlich Rundholz förderte. Dieser Vorgang betrug aber insgesamt nur 4% des Arbeitsablaufes. Das Sägen und der Vorschub benötigten mit 46% bzw. 48% maschinell bedingt annähernd gleich viel Zeit. Das Spalten erfolgte automatisch nach bzw. während des Sägevorgangs und wurde nicht extra notiert. Auch in der Teilstudie KK 5 waren die Arbeitsabläufe annähernd optimal gestaltet. Zusammenfassend bestand bei den Teilstudien KK 1, KK 3 und KK 4 ein Optimierungspotenzial, denn das Fördern nahm bei KK 1 einen zu großen Anteil ein, während bei KK 3 und KK 4 der Anteil des "Sägens" von 20% auf annähernd 50% hätte erhöht werden können.

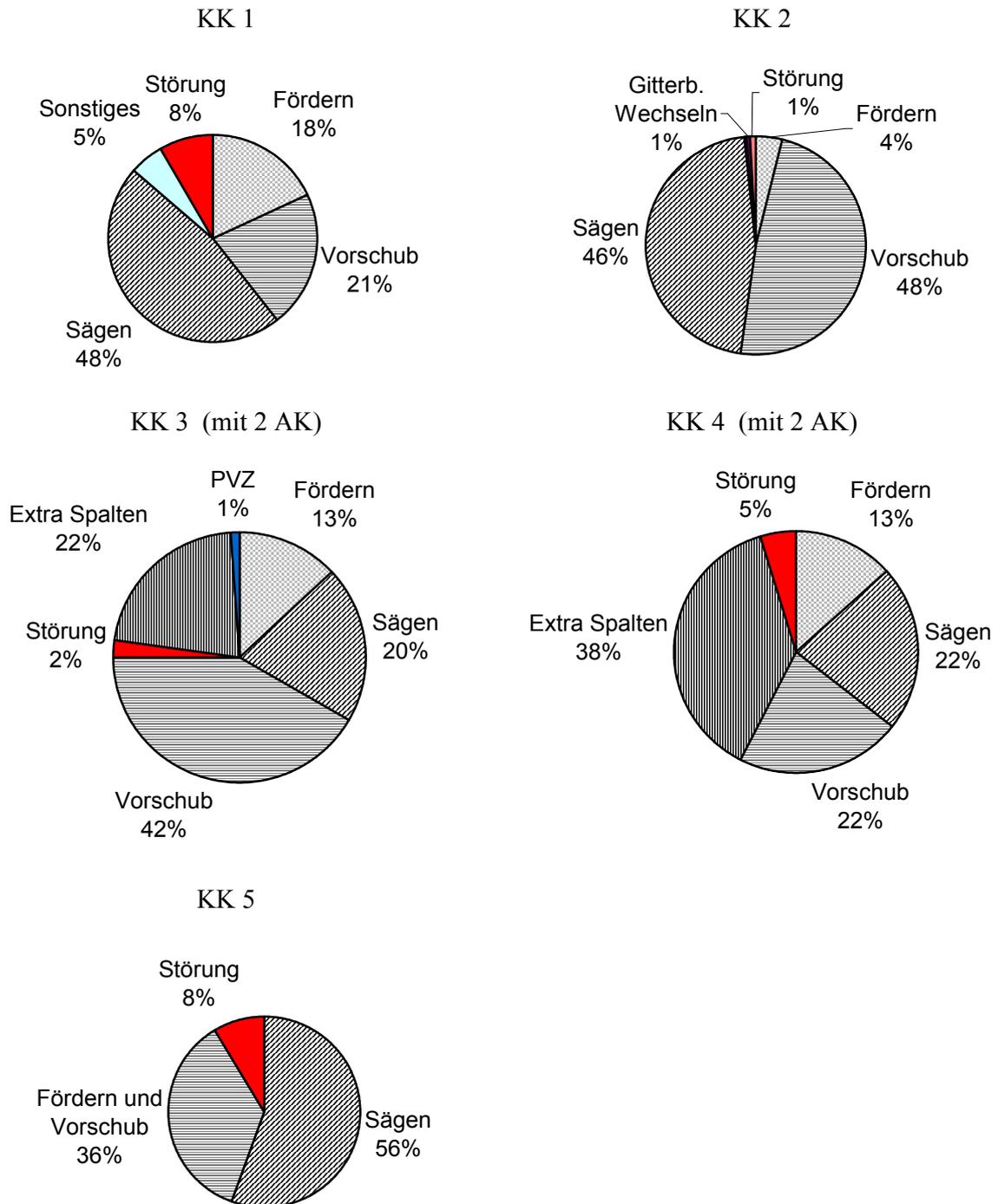


Abb. 57: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in Teilstudien mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK). Für KK 2 und 5 wurden Rohdaten einer früheren Untersuchung der LWF ausgewertet (Daten aus MALL [45])

Ein Vergleich der Zyklusdauer ist wegen der unterschiedlichen Rundholzlängen hier nicht sinnvoll, die Auswertungen beziehen sich daher nur auf die technische Arbeitsproduktivität (Abb. 58). Bei den Teilstudien KK 1 und KK 2 waren unterschiedliche Probanden am selben Gerät im Einsatz. Hierbei wird der Unterschied eines Probanden, der professionell arbeitet (KK 2) zu einem, der das Verarbeiten zu Brennholz nur im Nebenerwerb betreibt (KK 1, Proband ist im Hauptberuf

Zimmermann) verdeutlicht. Die durchschnittliche TAP ist mit 5,3 Fm/AKh (KK 1) zu 2,6 Fm/AKh (KK 2) verdoppelt. Der Grund für diesen Unterschied ist neben dem etwas besseren Ausgangssortiments (größere Mittendurchmesser, vgl. Abb. 56) vor allem in der bessere Gestaltung des Arbeitsablaufes zu suchen (vgl. Abb. 57). Letzteres gilt auch für die Teilstudien KK 3 und KK 4, welche mit einer mittleren TAP von 1,9 Fm/AKh (KK 3) und 2,5 Fm/AKh (KK 4) weit unter den Möglichkeiten der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen bleiben. Dies liegt aber auch am mobilen Bearbeitungsstandort, der in KK 3 und KK 4 im Wald an einer Forststraße lag. Im Unterschied dazu ist der Arbeitsablauf in Teilstudie KK 5 annähernd optimal gestaltet (vgl. Abb. 57). Lediglich das mit einem mittleren Mittendurchmesser von 11,2 cm zu klein dimensionierte Ausgangsmaterial (vgl. Abb. 56) führt in Teilstudie KK 5 zu einer verringerten TAP von nur 2,2 Fm/AKh (Tab. 12). Das beste Ausgangssortiment ist demnach für das Arbeiten mit kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen das größtmögliche, es liegt bei ca. 25 bis 30 cm Mittendurchmesser. Dieser Rückschluss basiert vor allem auf den Ergebnissen der Teilstudien KK 2 und KK 5, da in denen professionell gearbeitet wurde.

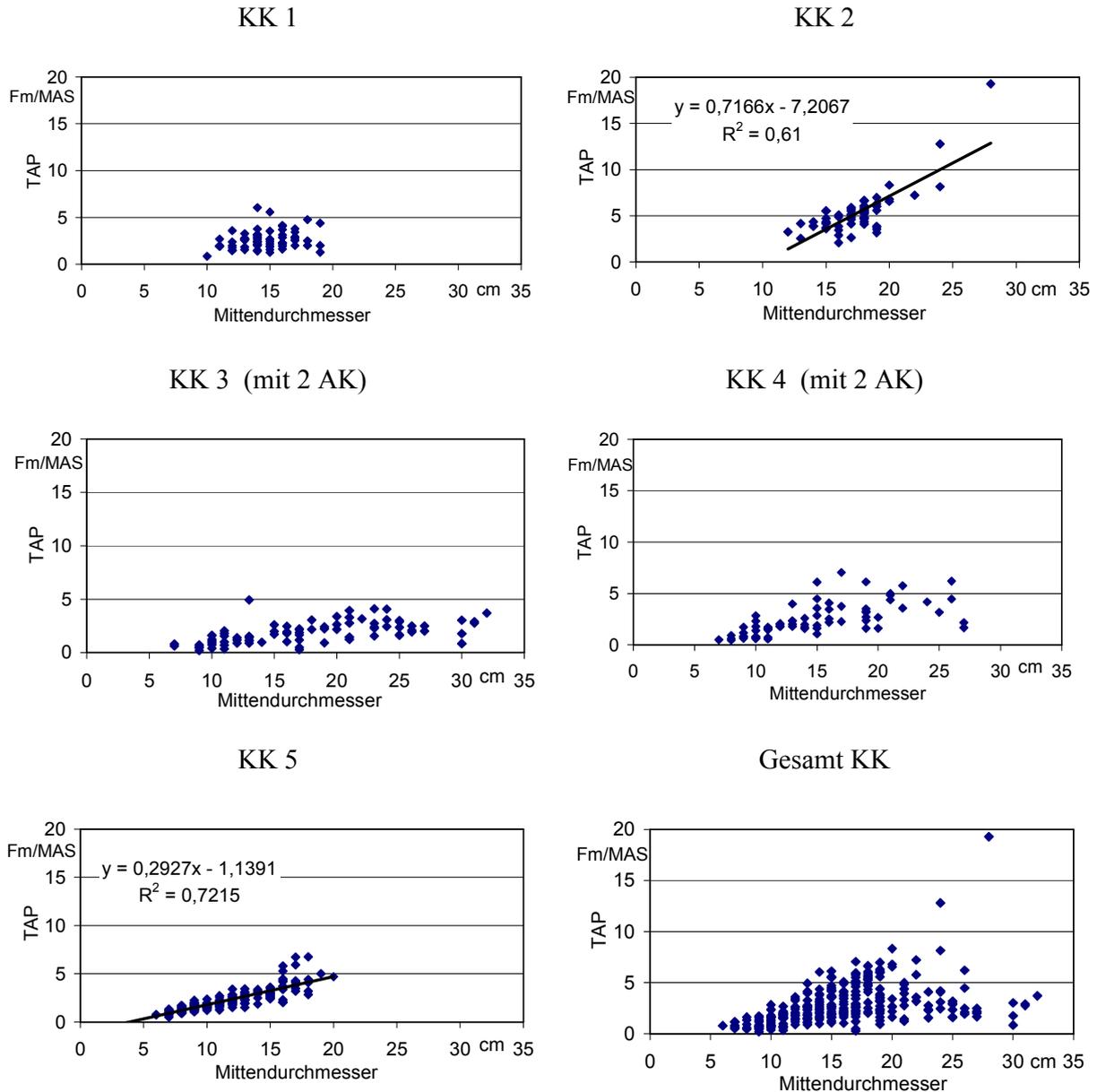


Abb. 58: Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je Maschinenstunde beim Einsatz der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK) in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge. AK Arbeitskräfte

Die Produktivität des Maschineneinsatzes der einzelnen Teilstudien KK 1 bis 5 mit den berechneten Produktivitäten bezogen auf die Anzahl der beteiligten Arbeitskräfte ist in Tab. 12 wiedergegeben. Die TAP ist gegenüber den GS-Studien zum großen Senkrechtspalter mit 2,8 Rm/AKh und den WS-Studien zum großen Waagrechtspalter mit 2,7 Rm/AKh auf 3,9 Rm/AKh pro beteiligter Arbeitskraft gestiegen.

Tab. 12: Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschinen- und Arbeitskräfteeinsatzes und mittlere Zyklusdauer beim Einsatz der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK-Studie). Berechnung der TAP je Maschinenarbeitsstunde MAS bzw. Arbeitskraftstunde AKh aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten

Teil-studie	Baumart	Mittlere Zyklusdauer [s]	Technische Arbeitsproduktivität (TAP)			
			des Maschineneinsatzes		des Arbeitskräfteeinsatzes	
			TAP [Fm/MAS]	TAP [Rm/MAS] ^a	TAP [Fm/AKh]	TAP [Rm/AKh] ^a
KK 1	Fichte	107,6	2,6	4,0	2,6	4,0
KK 2	Fichte	75,0	5,3	8,2	5,3	8,2
KK 3	Esche	98,0	1,9	3,1	1,0 ^b	1,6 ^b
KK 4	Esche	59,7	2,5	4,0	1,3 ^b	2,0 ^b
KK 5	Buche	57,8	2,2	3,5	2,2	3,5
Mittelwert		79,62	2,9	4,6	2,5	3,9

^a Umrechnung von Fm zu Rm nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.8.1); hier: Rm mit 33 cm Scheiten, gestapelt. Bei Esche wurden der Umrechnungsfaktor für Buche verwendet.

^b Hier waren zwei Arbeitskräfte (AK) eingesetzt worden, die TAP wurde auf 1 AKh umgerechnet.

5.1.3.6 Sägen und Spalten mit der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine

Beim Sägen und Spalten mit der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK) arbeitet in der Regel nur eine Person an dem Gerät, der Maschinist (Abb. 59). Auch die vorliegenden Messungen wurden so durchgeführt. Bei den Probanden handelte es sich um professionelle Arbeiter.



Abb. 59: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Spalten mit der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK). Hier: Herkules II, Fa. Kretzer

In drei Teilstudien GK 1, 2 und 3 wurde das gleichzeitige Ablängen und Spalten zu 33 cm Scheiten von insgesamt 197 Rundhölzern der Baumart Buche (*Fagus sylvatica*) mit einer durchschnittlichen Länge von 6,2 m über insgesamt 10:31 h untersucht. Es wurden zwei verschiedene Geräte der Firmen S&Ü und Kretzer eingesetzt. Die Maschinen und Rahmenbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 10.1 zusammengestellt.

Mit einem mittleren Mittendurchmesser von 25,9 cm weist das hier verwendete Rohsortiment erwartungsgemäß die größte Holzstärke aller Studien auf. Am häufigsten ist das Rundholz mit Mittendurchmessern von 21 bis 25 cm (Abb. 60). Unter 16 cm wird kein Rundholz verwendet, die maximale Stärke liegt bei 45 cm. Während der maximale Mittendurchmesser bei den Studien GK 1 und GK 2 maschinenbedingt noch auf 35 cm begrenzt ist, kann die Maschine in der Studie GK 3 auch Durchmesser bis 65 cm verarbeiten.

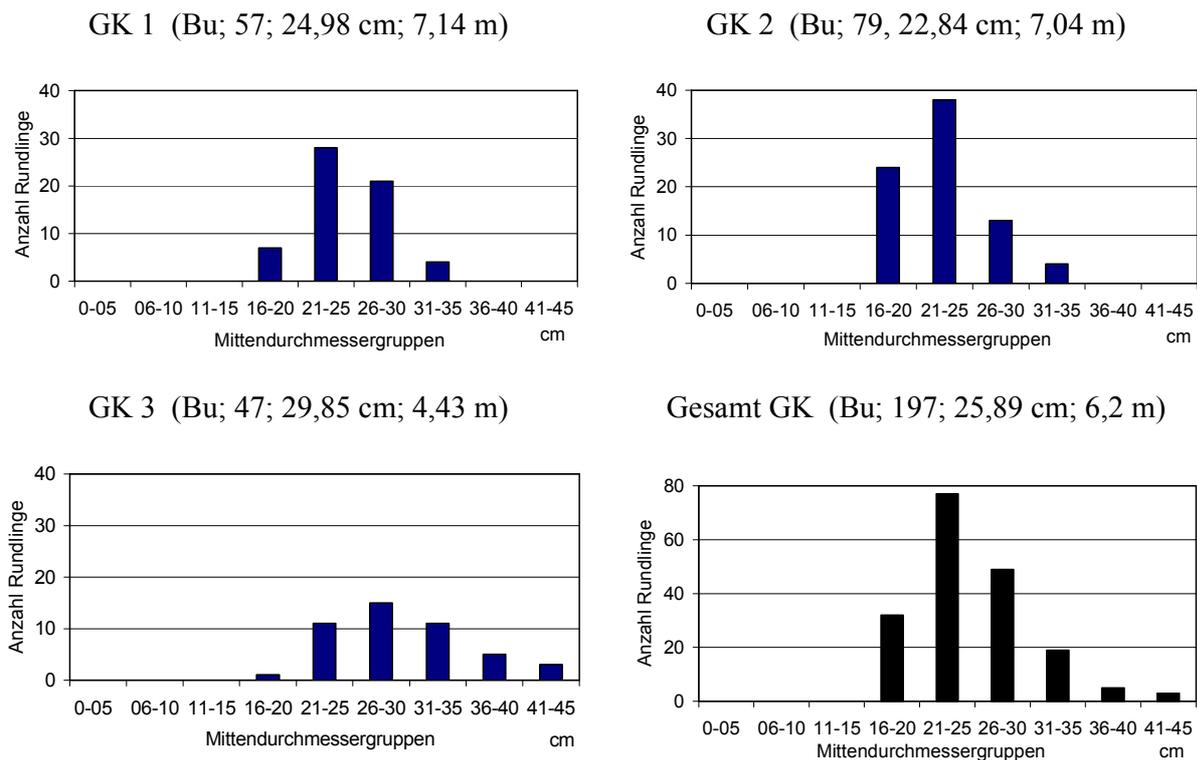


Abb. 60: *Verteilung der Mittendurchmesser in den Teilstudien zur großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK). Grafiktitel mit Baumart, Anzahl der Rundhölzer, mittlerem Mittendurchmesser und mittlerer Länge*

Im Vergleich zu den Messungen an kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen (KK) nehmen die Störungen bei den großen Maschinen (GK) auf zum Teil bis zu 20% Anteil erkennbar zu (Abb. 61). Offenbar wirken sich hier die hohen Materialbelastungen und die erschwerte Handhabbarkeit des Rohmaterials infolge der großen Holzdurchmesser und -längen aus. Hier besteht offenbar noch Potenzial für technische Verbesserungen zur Reduzierung der Störanfälligkeit. In der Teilstudie GK 2 waren derartige Verbesserungen bereits realisiert, diese Messungen erfolgten ca. 1 Jahr nach der Teilstudie GK 1, die mit demselben Probanden an derselben leicht veränderten Maschine durchgeführt worden war. Die Verbesserungen führen zu einer Verringerung der Störungen von 18% auf 5%. Zusätzlich gelang es in GK 1 die Lagerbehälter des fertig gespaltenen Scheitholzes während des Betriebs auszutauschen, so dass dieser Vorgang nicht mehr als eigener Arbeitsablaufabschnitt auftaucht. Alle Verbesserungen bewirkten eine Steigerung der Leistung. Weitere Steigerungen sind möglich, z. B. könnten die Anteile für "Fördern" (7% und 8%) bei einem optimalen Ablauf auf nahezu 0% gesenkt werden, da dieser Abschnitt nur dann notiert wurde, wenn die Maschine ausschließlich mit Fördern, d. h. dem Zuführen des Rundholzes vom Vorratsgestänge auf das Förderband, beschäftigt war.

In der Teilstudie GK 3 gelang es dahingegen, diesen Anteil auf nur 2% Anteil zu reduzieren, indem beinahe jedes Rundholz parallel zur Bearbeitung des vorhergehenden Rundholzes auf das zuführende Förderband bewegt werden konnte. Dennoch sind die Arbeitsabläufe auch bei dieser Teilstudie nicht als optimal zu bezeichnen, da die Anteile von "Störung" und "Sonstiges" noch zu hoch sind. Unter "Störung" fällt hier z. B. ein zu geringer Anpressdruck und somit uneffektives

Sägen oder ein Zurechtrücken des bereits abgelängten Teilrundlings vor dem Pressen durch das Spaltkreuz. Unter "Sonstiges" wurde z. B. die Verlagerung des abführenden Förderbandes zum nächsten freien Lagerplatz oder das Beladen des Vorratsgestells mit neuem Rundholz notiert.

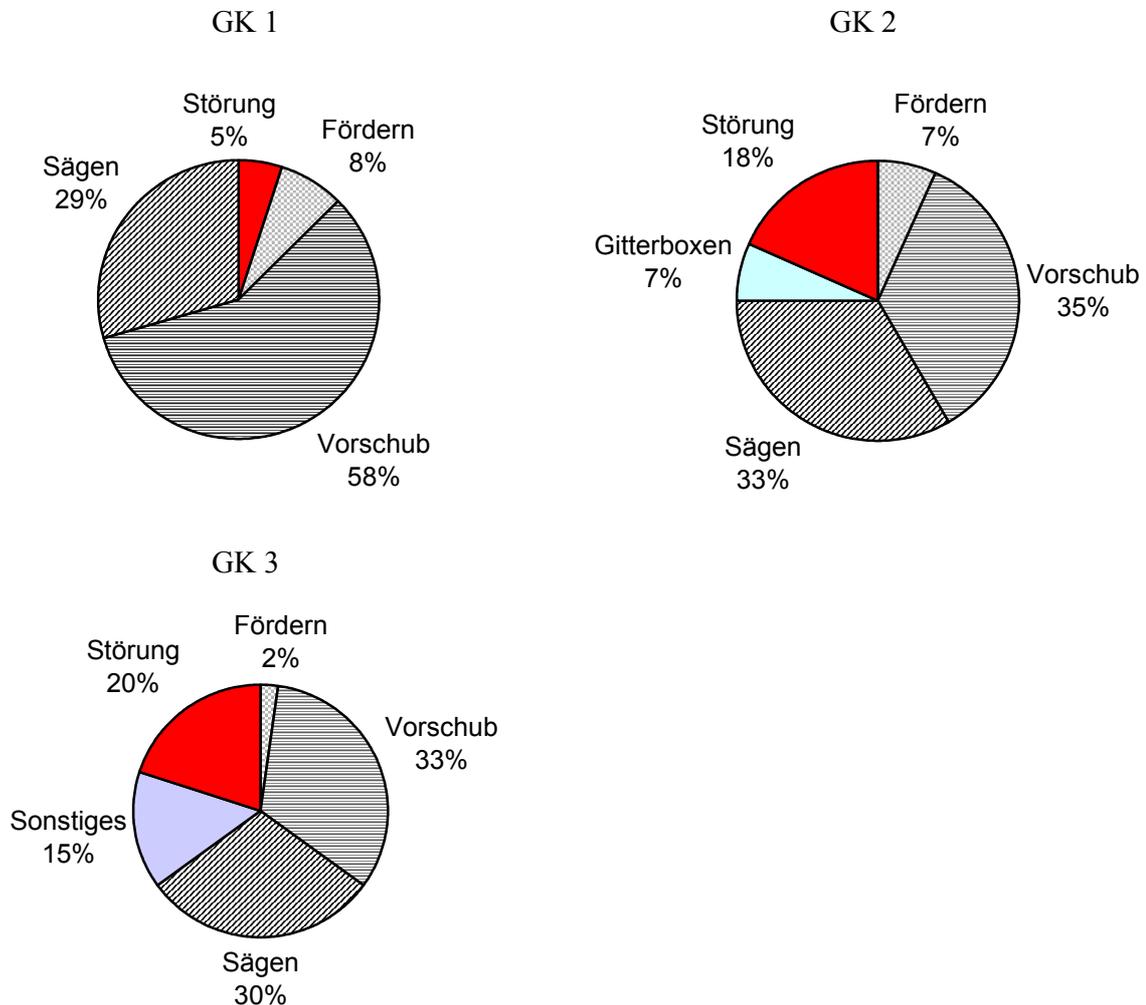


Abb. 61: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den Teilstudien mit großen kombinierten Säge-Spaltmaschinen (GK). Zur Teilstudie GK 3 wurden Rohdaten einer früheren Untersuchung der LWF ausgewertet (Daten zu MALL [45])

In den Teilstudien GK 1 bis GK 3 ist eine klare Leistungsabhängigkeit zum Mittendurchmesser des Rohholzes zu erkennen, das zeigt Abb. 62. Das optimale Sortiment für das Arbeiten mit den großen kombinierten Säge-Spaltmaschinen ist das größtmögliche. Maximal wurde somit in Teilstudie GK 1 bei einem Mittendurchmesser von 35 cm eine "momentane" Produktivität von über 12 Fm pro Maschinenarbeitsstunde (MAS) festgestellt. Bei kleinen Mittendurchmessern von ca. 20 cm sinkt die Produktivität auf nur noch ca. 4 Fm/MAS. Bei einem Sortiment mit Rundholz von 30 cm Stärke kann die Produktivitätsschwankung je nach Maschine und Einstellung mehr als 5 Fm/MAS betragen (siehe Gesamt GK, Abb. 62).

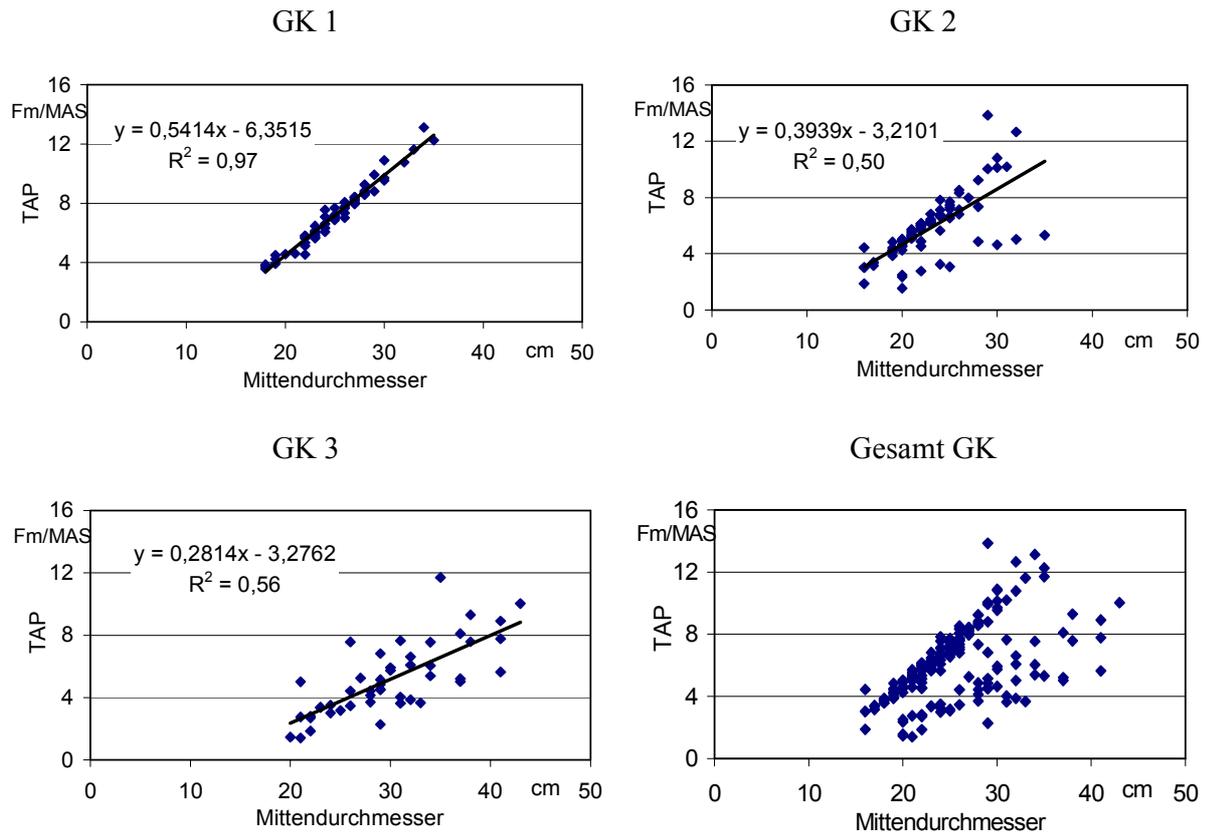


Abb. 62: Technische Arbeitsproduktivität (TAP) je Maschinenstunde beim Einsatz der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK) in Abhängigkeit vom Mittendurchmesser der Rundlinge. AK Arbeitskräfte

Die mittlere technische Arbeitsproduktivität (TAP) in den einzelnen Teilstudien GK 1 bis GK 3 und die mittlere Zyklusdauer sind in Tab. 13 wiedergegeben. Gegenüber der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine (KK) ist die mittlere TAP von 2,5 Fm/MAS auf 6,0 Fm/MAS angestiegen. Innerhalb der Teilstudien war die Zyklusdauer wegen der unterschiedlichen Rohholzlängen stark variabel, daher bietet die Angabe der mittleren Zyklusdauer in Tab. 13 hier nur einen ungefähren Anhaltswert.

Tab. 13: Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschineneinsatzes und mittlere Zyklusdauer beim Einsatz der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine (GK-Studie). Berechnung der TAP je Maschinenarbeitsstunde (MAS) aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten. Eine MAS entspricht hier einer AKh.

Teilstudie	Baumart	Mittlere Zyklusdauer [s]	TAP [Fm/MAS]	TAP [Rm/MAS] ^a	TAP [SRm/MAS] ^a
GK 1	Buche	260	7,2	11,6	17,1
GK 2	Buche	200	5,8	9,3	13,8
GK 3	Buche	303	5,1	8,2	12,1
	Mittelwert	254,3	6,0	9,7	14,3

^a Umrechnung von Fm zu Rm bzw. SRm nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.8.1); hier: Rm bzw. SRm mit 33 cm Scheiten

5.1.3.7 Trennschnitte mit der Brennholz-Kreissäge

Für die Studie "Trennschnitte mit der Brennholz-Kreissäge (KR)" wurde in fünf Teilstudien KR 1 bis KR 5 das Ablängen zu 33 cm Stücken von insgesamt 205 Rundhölzern und 960 bereits gespaltenen Scheiten der Baumart Fichte (*Picea abies*) und Buche (*Fagus sylvatica*) mit einer Länge von 1,0 m in insgesamt 5:42 h untersucht. Hierbei wurde nur eine einzelne Arbeitskraft benötigt. Bei den hier eingesetzten Probanden handelte es sich um einen jungen Landwirt und einen jungen Diplom Forstwirt, beide sind als semi-professionell arbeitend einzustufen. Die Maschinen und Rahmenbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 10.1 zusammengestellt.



*Abb. 63: Arbeitsplatzbeispiel für Zeitstudie zum Trennschnitt mit der Kreissäge (KR).
Hier: WK 771, Fa. BGU*

Im Ergebnis zeigt sich, dass der Anteil des "Sägens" ca. 40 bis 46% des gesamten Arbeitsablaufs ausmacht (Abb. 64). Die übrige Arbeitszeit wird zu etwa gleichen Teilen für "Holz holen" und "Holz ablegen" benötigt, je nach Standort der Lager. Wenn nicht gespaltene Scheite sondern Rundlinge abgelängt werden, kommt es hin und wieder zu einem Verklemmen des Sägeblatts, hierdurch sind die mit 5% bei KR 2 und mit 6% bei KR 3 zu Buche schlagenden "Störungen" zu erklären.

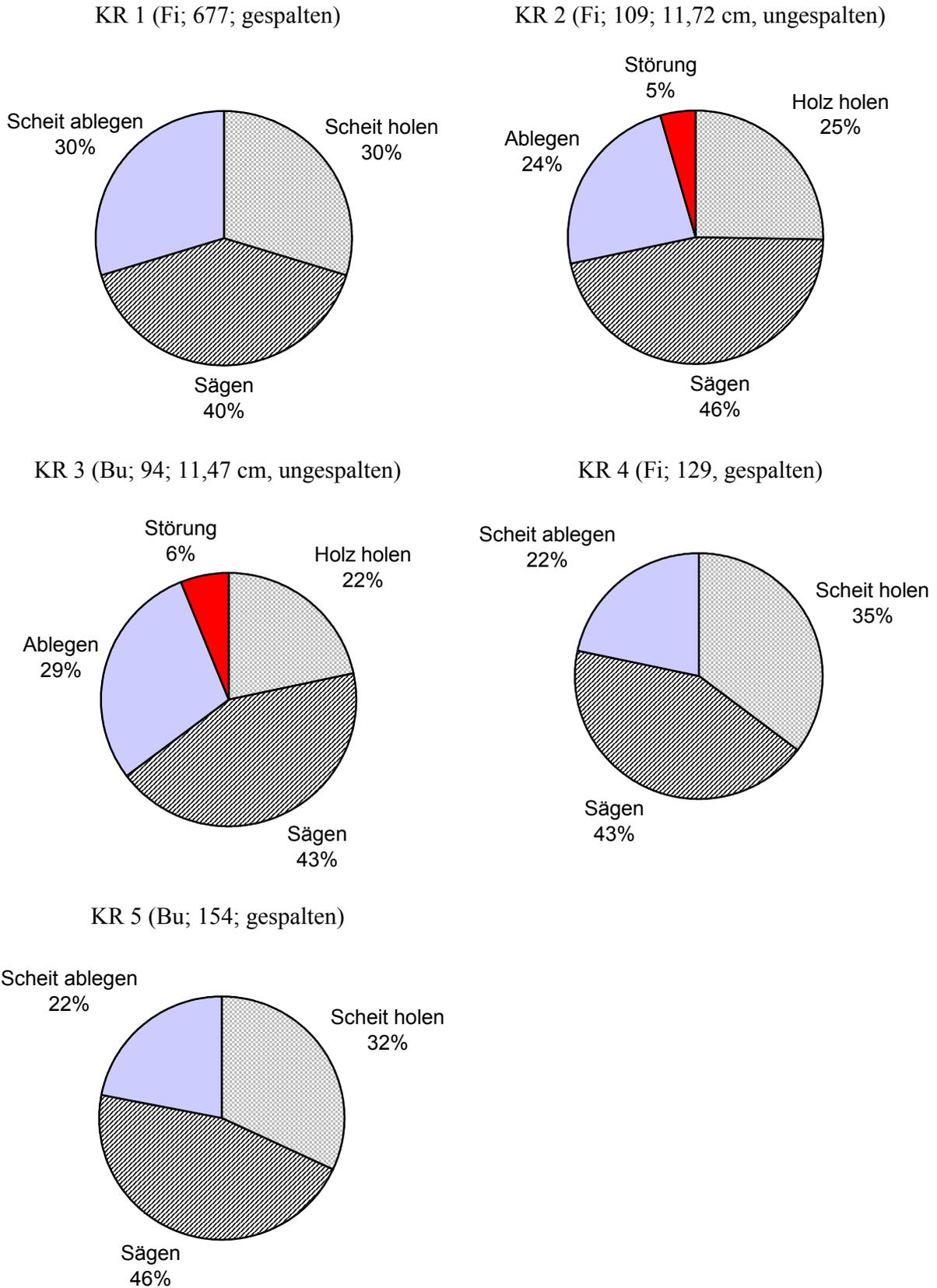


Abb. 64: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte in den 5 Teilstudien zum "Trennschnitt mit der Brennholz-Kreissäge" (KR). Grafiktitel mit Baumart, Anzahl der Meterhölzer, ggf. mittlerem Mittendurchmesser (bei Rundlingen) und Aufbereitungsform

Die mittlere technische Arbeitsproduktivität (TAP) und die mittlere Zyklusdauer in den einzelnen Teilstudien KR 1 bis KR 5 sind in Tab. 14 wiedergegeben. Unabhängig davon, ob Rundlinge oder gespaltene Scheite gesägt werden, liegt die mittlere TAP bei durchschnittlich 4,1 SRm/AKh. Offenbar wird bei den Rundlingen der Vorteil der größeren Durchmesser durch den Nachteil der höheren Störanfälligkeit (Verklemmen des Sägeblattes) und der somit deutlich längeren Zykluszeit je Meterholz kompensiert. Unterschiede bestehen zwischen den Holzarten. Bei der schwereren und härteren Buche wird durchschnittlich eine TAP von 3,3 SRm/MAS erreicht, wohingegen die TAP bei der Fichte bei durchschnittlich 4,6 SRm/MAS liegt.

Tab. 14: *Mittlere technische Arbeitsproduktivität (TAP) des Maschineneinsatzes beim Ablängen mit der Brennholz-Kreissäge. Berechnung der TAP je Maschinenarbeitsstunde (MAS) aus Gesamtholzmenge und Gesamtarbeitszeit GAZ, d. h. ggf. inklusive Rüst-, Stör- und Verteilzeiten. Eine MAS entspricht hier einer AKh.*

Teilstudie	Baumart/Aufbereitung	Mittlere Zyklusdauer [s]	TAP [Fm/MAS]	TAP [Rm/MAS] ^a	TAP [SRm/MAS] ^a
KR 1	Fichte, gespalten	14,3	-	2,9	4,7
KR 2	Fichte, ungespalten	25,1	1,7	-	4,3
KR 3	Buche, ungespalten	31,9	1,4	-	3,3
KR 4	Fichte, gespalten	14,0	-	3,0	4,9
KR 5	Buche, gespalten	15,6	-	2,2	3,3
	Mittelwert		1,6	2,7	4,1

^a Umrechnung von Fm zu Rm bzw. SRm nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.8.1); hier: Rm bzw. SRm mit 33 cm Scheiten

5.1.3.8 Schichten und Laden von Scheitholz

Das Schichten und Laden des Scheitholzes wurde in vier Teilstudien SC 1 bis 4 über insgesamt 9:03 h untersucht. Die Teilstudien umfassen das Schichten mit Bündelhilfe zu 0,5 Rm bzw. 1 Rm großen Rundbündeln (SC 1 und SC 2, vgl. Abb. 66), das Schichten ohne Bündelhilfe (SC 3) sowie das Befüllen von Gitterboxen (SC 4). In Tab. 15 sind die hierzu gemessenen Verfahren und die dafür berechneten Gesamtproduktivitäten zusammengestellt. Die Berechnung einer mittleren TAP ist wegen der untereinander nicht vergleichbaren Verfahren nicht sinnvoll. Die Geräte und Rahmenbedingungen zu den Messungen sind in Anhang 10.1 zusammengestellt.



Abb. 65: Arbeitsplatzbeispiel für das Stapeln und Bündeln mit einer Bündelhilfe, hier für 0,5 Rm-Bündel

Tab. 15: Technische Gesamt-Arbeitsproduktivität (TAP) beim Scheitholz-Schichten und -laden in verschiedenen Lagerformen (SC-Studien)

Teil-studie	Standort	Verfahren	Baumart und Scheitlänge	TAP [Rm/AKh]	TAP [SRm/AKh]
SC 1	Hofstelle	Bündeln mit Bündelhilfe zu 0,5 Rm Rundbündel	Buche und Fichte / 1 m	2,3 ^a	–
SC 2	Lagerhalle	Bündeln mit Bündelhilfe zu 1 Rm Rundbündel	Buche und Fichte / 1 m	3,7	–
SC 3	Betriebs-gelände	Schichten von 33 cm Scheiten ohne Bündelhilfe	Buche und Fichte / 33 cm	3,0	–
SC 4	Betriebs-gelände	händisches Befüllen einer 2 m hohen Gitterbox	Buche und Fichte / 33 cm	–	4,6

^a Hier waren zwei Arbeitskräfte (AK) eingesetzt worden, die TAP wurde auf 1 AKh umgerechnet.

In den Studien SC 1 und SC 2 (Schichten mit Bündelhilfe) wurden neben der Gesamtproduktivität auch die einzelnen Anteile der Arbeitsablaufabschnitte aufgenommen. Die Ergebnisse sind in Abb. 66 dargestellt. In der Studie SC 1 waren zwei Arbeitskräfte gleichzeitig mit der Bündelung von Meterscheiten zu 0,5 Rm Rundbündeln beschäftigt. Da die Bündelhilfe erst nach dem Zusammenzurren und Binden des Bündels wieder weiterverwendet werden kann, ergibt es sich, dass eine Arbeitskraft während des Bindens auf die andere Arbeitskraft bis zum Kippen des vollständigen Bündels aus dem Rahmen warten muss, wodurch dieser Ablaufabschnitt mit relativ unpro-

duktiven Wartezeiten verbunden ist. Hier wäre eine weitere Bündelhilfe hilfreich, um auch die zweite Arbeitskraft voll auszulasten, denn so wurde auf das eigentliche Stapeln in Studie SC 1 nur 38% der gesamten Arbeitszeit verwendet. In Studie SC 2 fallen diese Wartezeiten weg, da nur eine einzige Arbeitskraft eingesetzt wurde. Da zudem größere Bündel von 1 Rm erstellt wurden, steigt der Anteil für das Stapeln auf 60% der Arbeitszeit. Die Produktivität steigert sich dadurch von 2,3 auf 3,7 Rm/AKh. Der Arbeitsablaufabschnitt "Kippen" wird in der Studie SC 1 nicht extra aufgeführt und ist im Abschnitt "Ortswechsel" mit enthalten.

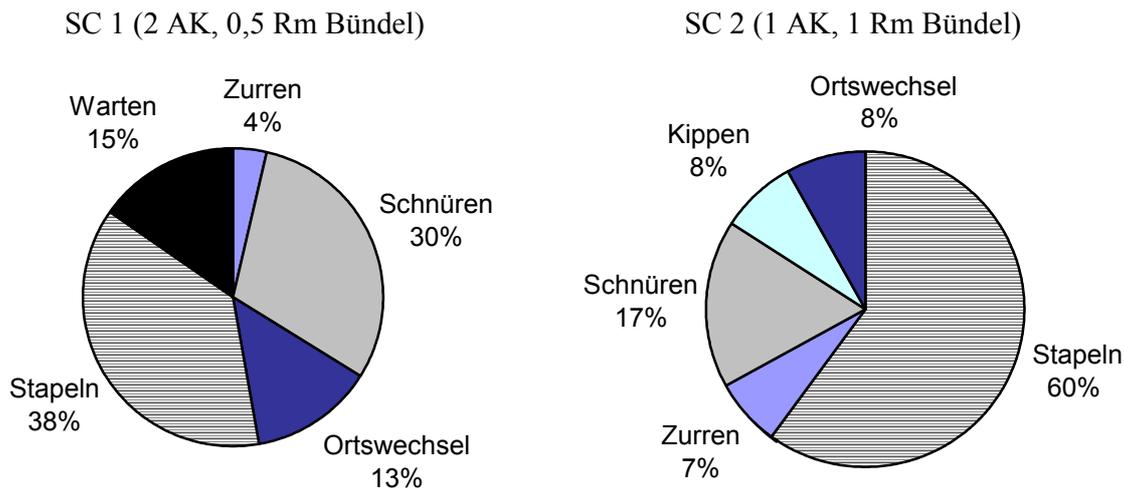


Abb. 66: Zeitliche Verteilung der Arbeitsablaufabschnitte beim Schichten mit Bündelhilfe (Teilstudien SC 1 und 2). AK Arbeitskraft

5.1.4 Zusammenfassung der Ergebnisse zur Brennholzaufbereitung

Typische Sortiment. Die hier vorgestellten Ergebnisse sind vor dem Hintergrund der üblichen Schwankungen beim verwendeten Ausgangssortiment (vor allem Durchmesser) nicht immer vollständig miteinander vergleichbar. Zwar war es das Ziel, die betrachteten Werkzeuge oder Maschinen unter den für sie typischen Einsatzbedingungen zu bewerten, allerdings war hierbei auch die natürliche oder zufällige Variabilität der Durchmesser in Kauf zu nehmen. Tendenziell kann aber festgestellt werden, dass mit zunehmendem Mechanisierungsgrad auch die Durchmesser zunehmen, was die üblichen Praxiseinsatzbedingungen in etwa zutreffend widerspiegelt. Eine Ausnahme bildet lediglich das "Spalten mit dem Spalthammer". Bei dem hierfür verwendeten Rohholz war das Ausgangssortiment mit einem mittleren Mittendurchmesser von 17,9 cm für die manuelle Zerkleinerung überdurchschnittlich stark.

Eine Übersicht über die mittleren Mittendurchmesser der jeweiligen Teilstudien bietet Tab. 16. Dabei fällt auf, dass die Sortimentstärke vom kleinen zum großen Spalter (senkrecht oder waagrecht) von ca. 12 auf ca. 20 cm steigt, was den üblichen Verwendungsbereich der großen Spalter für weniger handliche Holzstärken unterstreicht. Bei den kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen ist der mittlere Mittendurchmesser mit ca. 15 cm wieder etwas geringer, was wegen der häufigen Verwendung längerer Holzstangen (hier ca. 3 m), beispielsweise aus der Jungdurchforstung, ebenfalls plausibel und praxisüblich erscheint. Passend zur hohen Durchsatzleistung wird dagegen

bei den großen kombinierten Säge-Spaltmaschinen mit ca. 26 cm mittlerem Mittendurchmesser das stärkste Ausgangssortiment eingesetzt. Auch hier erscheint eine Verallgemeinerung der Ergebnisse angesichts der für das Verfahren erforderlichen rationellen und hochmechanisierten Bereitstellungskette für ganze Schaftrohlinge ebenfalls zulässig.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die hier gewählte, zum Teil unterschiedliche, Rohstoffbasis als relevant und praxisgerecht anzusehen ist. Eine für alle Messungen einheitliche Sortimentsauswahl hätte zwar methodisch unzweifelhaft eine bessere direkte Vergleichbarkeit der Messergebnisse ermöglicht, jedoch wäre die Untersuchung dadurch den spezifischen besonderen Einsatzbedingungen der einzelnen Verfahren nicht gerecht geworden und hätte die Beurteilung typischer Verfahrensketten (vgl. Kapitel 5.9) in Frage gestellt.

Produktivität. Wie erwartet ist die Produktivität bei der Arbeit mit dem Spalthammer mit 0,12 (Buche) bzw. 0,43 Fm/AKh (Fichte) unter allen Verfahrensalternativen am niedrigsten, zumal hier auch – wie erwähnt – im Fall der Buche weniger typisches Ausgangsmaterial verwendet worden war. Bei Fichtenholz waren die Holzstärken für den Spalthammer dagegen mit denen der Kleinen-Senkrechtspalterstudien vergleichbar. Daher kann hier auch die Aussage getroffen werden, dass die Produktivität sich zumindest beim kurzzeitigen Einsatz nicht wesentlich unterscheidet. Allerdings bietet eine hydraulische Spalthilfe im Unterschied zur Axt oder zum Spalthammer neben den Sicherheitsvorteilen und der verbesserten Arbeitsschwere (vgl. hierzu Kapitel 5.2) auch eine höhere Leistungskonstanz.

Die Produktivität eines großen Senkrechtspalters liegt mit 1,36 Fm/AKh (Buche) bzw. 1,62 Fm/AKh (Fichte) schon um ein Mehrfaches über dem des kleinen Spalters, das zeigt die zusammenfassende Tab. 16, in der für eine bessere Verwendung der Ergebnisse auch die Produktivität in der Einheit der Vermarktungssortimente Schichtholz (Rm) und geschüttete Scheite (SRm) angegeben wird. Auch die Arbeit mit dem Waagrechtspalter unterscheidet sich dabei in der Größenordnung nicht vom großen Senkrechtspalter (1,48 Fm/AKh, Fichte).

Zu berücksichtigen ist bei diesen Leistungsvergleichen allerdings, dass das Holz im Vergleich zum kleinen Spalter noch eine Länge von einem Meter hat. Ein Meterscheit hat ungefähr das dreifache Volumen eines kurzen Scheites (33 cm), folglich erhöht sich die Leistung bei den großen Spaltern auch entsprechend. Das Ablängen (Sägen) der so entstandenen langen Scheite erfordert noch einmal etwa den gleichen Aufwand wie das Spalten selbst (Tab. 16). Ein direkter Vergleich der Aufbereitungsverfahren ist somit nur durch Aggregation der Teilleistungen in einer vollständigen Prozesskette zulässig, derartige Betrachtungen finden sich in Kapitel 5.9.3.

Für das anschließende Aufschichten der gespaltenen 33 cm-Scheite (ohne Bündelhilfe) ist bei beiden Holzarten eine technische Arbeitsproduktivität (TAP) von 2,98 Rm/AKh anzusetzen, das entspricht umgerechnet 1,9 Fm/AKh. Größere Holzartenunterschiede von 1,36 bis 3,90 Fm/AKh (Buche und Fichte) ergeben sich dagegen bei den kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschinen. Hier zeigt sich, dass die Bearbeitung der Fichte aufgrund ihrer geringeren Rohdichte tatsächlich Vorteile bietet, diese zeigen sich in der höheren Vorschubgeschwindigkeit und der geringeren Störanfälligkeit verglichen mit Buche. Der verhältnismäßig große Unterschied ist jedoch zusätzlich noch auf den unterschiedlichen Leistungsgrad der Probanden sowie auf das bei den Hartholzversuchen im Wald fehlende Gestell zum einfachen Abrollen des Rundholzes auf das Förderband

und auf die ungünstigen Standortbedingungen im Wald (beengt, der Witterung voll ausgesetzt, weicher unebener Boden, schlechte Lichtverhältnisse) zurückzuführen. Die Versuche mit Fichtenholz erfolgten dagegen auf einem befestigten Aufarbeitungsplatz.

Einen weiteren Produktivitätssprung ermöglichen die großen kombinierten Säge-Spaltmaschinen, bei denen hier nur die Verarbeitung von Buche untersucht wurde, da Laubholz das überwiegend eingesetzte Ausgangsmaterial für diese Maschinen darstellt. Da der hier festgestellte Messwert von ca. 6,03 Fm/AKh einen Mittelwert aus drei Untersuchungen darstellt und die verwendeten Maschinen z.T. während des Betrachtungszeitraums noch technisch verbessert worden waren, kann davon ausgegangen werden, dass zukünftig eher noch höhere Produktivitätswerte realistisch sind.

Tab. 16: *Vergleich der Technischen Gesamtarbeitsproduktivität aller untersuchten Teilverfahren; Die Werte in Raummeter und Schüttraummeter errechnen sich aus den Ergebnissen für Festmeter unter Verwendung der Umrechnungsfaktoren in Kapitel 5.8.1, MDM: Mitteldurchmesser*

Teilverfahren	Mittlerer MDM ^a (cm)	TAP Buche (Fm/AKh)	TAP Fichte (Fm/AKh)	TAP Buche (Rm/AKh)	TAP Fichte (Rm/AKh)	TAP Buche (SRm/AKh)	TAP Fichte (SRm/AKh)
Spalthammer (SP, 33 cm)	17,9 (21,6/14,3)	0,12	0,43	0,19	0,67	0,29	1,08
Kleiner Senkrechtpalter (KS, 33 cm)	12,3 (12,4/12,2)	0,49	0,38	0,79	0,59	1,17	0,96
Großer Senkrechtpalter (GS, 1 m)	20,1 (19,6/20,4)	1,36	1,62	2,69	2,92	–	–
Großer Waagrechtspalter (WS, 1 m)	20,4 (-/20,4)	-	1,48	–	2,66	–	–
Kl. komb. Säge-Spaltmaschine (KK, 33 cm)	15,2 (14,6/16,0)	1,36	3,90	2,18	6,04	3,24	9,83
Gr. komb. Säge-Spaltmaschine (GK, 33 cm)	25,9 (25,9/-)	6,03	–	9,71	-	14,35	-
Brennholzkreissäge (KR, 33 cm) ^b	11,6 (11,5/11,7)	1,39	1,67	2,23	2,59	3,31	4,21
Aufschichten (SC, 33 cm)	–	1,88	1,88	2,98	2,98	4,63	4,63

^a Werte in Klammern: Buche/Fichte

^b Werte nur aus ungespaltenem Ausgangsmaterial

5.2 Ergebnisse der Arbeitsschwereuntersuchung

Die Arbeitsschwere bei der Scheitholzaufbereitung wurde sowohl empirisch mittels Befragung als auch über ein Multimomentverfahren mit Auswertung von Bilderfolgen (OWAS-Methode untersucht. Nachfolgend werden die Ergebnisse zu den beiden unterschiedlichen methodischen Ansätzen, die in Kapitel 4.2 erläutert werden, vorgestellt.

5.2.1 Befragung zur Arbeitsschwere

Auf einer Skala von 0 für „sehr leicht“ bis 5 für „sehr schwer“ wurden in der Befragung für die Einschätzung der Arbeitsschwere Mittelwerte zwischen 2,0 für Arbeiten am großen Spaltautomat und 4,4 für das Durchforsten erzielt (Abb. 67). Zwischen den Befragten, die eigene Erfahrung mit diesen Arbeiten aufwiesen, und solchen, welche die Arbeiten aus eigener Erfahrung nicht kannten, traten keine wesentlichen Unterschiede in der Bewertung auf. Kleinere Abweichungen kamen aber vor, so bewerteten die erfahrenen Befragten tendenziell die schweren Arbeiten noch ein wenig schwerer (Durchforsten 4,4 verglichen mit 4,1) und leichte noch ein wenig leichter (Arbeiten am großen Spaltautomat 2,0 verglichen mit 2,3). Auffallend ist die einheitliche Bewertung der leichtesten Arbeit, das Bedienen des großen Spaltautomaten (Bewertung 2,0). Auf dem Bild, welches dem Befragten hierzu als Orientierungshilfe dienen sollte, war ein Mann abgebildet, der stehend die Schalter des Bedienpults betätigte. Mit 2,0 ist diese Tätigkeit aber noch als "normal schwer" beschrieben, obgleich vom Arbeiter keine körperliche Arbeit wie Heben oder Senken etc. zu bewerkstelligen ist.

Dieses Beispiel verdeutlicht die Schwierigkeiten bei der Bewertung der Arbeitsschwere. Für die Befragten war offensichtlich die Tatsache, dass die Arbeiten im Außenbereich und in einem lauten Umfeld mit großen Holzmassen stattfinden, Grund genug, die relativ leichte Arbeit schon mit "normal schwer" zu beurteilen. Offenbar war hier nicht allein die Belastung durch die Beanspruchung des Stützapparates des Menschen ausschlaggebend.

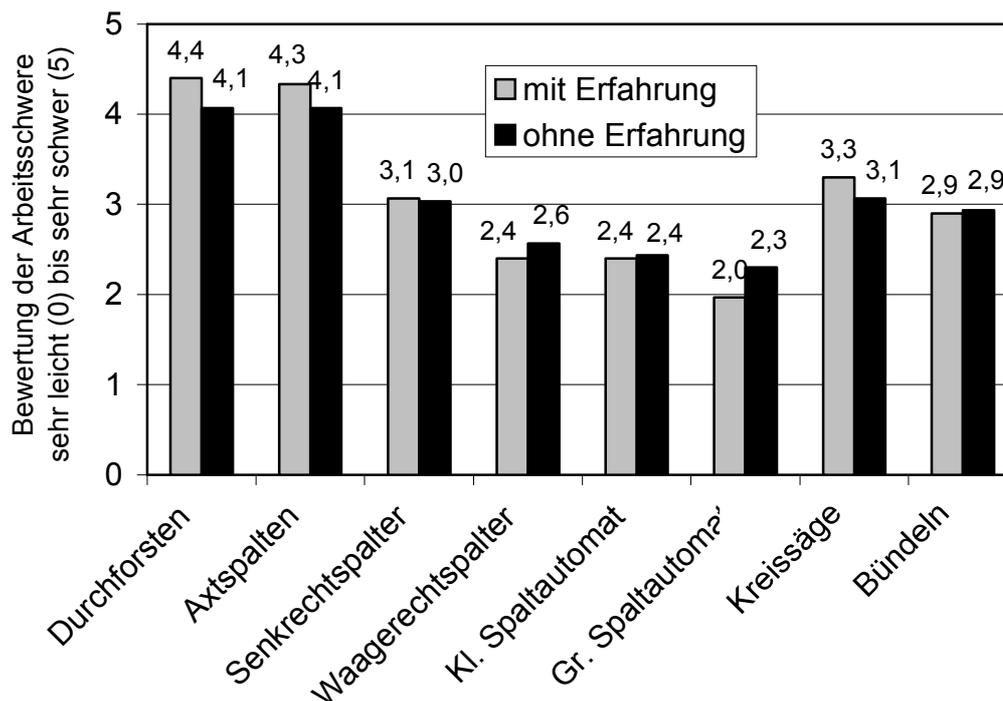


Abb. 67: Ergebnisse der Befragung zur Einschätzung der Arbeitsschwere; Einteilung von sehr leicht (0) bis sehr schwer (5). Beim Senkrechtspaltern erfolgte keine Differenzierung in große oder kleine Geräte

5.2.2 Arbeitsschwereindex nach der OWAS-Methode

Auf Basis der in Kapitel 4.2.2 vorgestellten Methode der Arbeitsschwereuntersuchung nach OWAS wurde der aus den bildanalytischen Auswertungen abgeleitete Belastungsindex L nach Lundquist für jedes Arbeitsverfahren ermittelt. Dabei werden die Belastungsindizes auch differenziert für die Ablaufabschnitte innerhalb der Arbeitsverfahren berechnet. Über die darin gleichzeitig dargestellten Zeitanteile der Ablaufabschnitte, die aus den OWAS-Bilderfolgen parallel ausgewertet wurden, lässt sich dann für jedes Arbeitsverfahren ein gewichteter Gesamtindex berechnen. Diese Vorgehensweise war erforderlich, damit auch solche Arbeitsverfahren bewertet und verglichen werden können, bei denen mehr als nur eine einzige Arbeitskraft eingesetzt worden war, zumal dann die zweite Person nicht zeitgleich mit einer Videokamera beobachtet worden war, sondern rechnerisch über die Zeitanteile und den separat gemessenen Teil-Belastungsindex hinzugefügt wurde. Die Berechnung der ablaufabschnittbezogenen Teilindizes erlaubt außerdem eine differenziertere Bewertung der Verfahren, weil auf diese Weise auch Belastungsspitzen innerhalb des Arbeitsablaufes sichtbar werden. Die ebenfalls dargestellten Zeitanteile der Ablaufabschnitte sollten allerdings nicht für eine Charakterisierung des Gesamtverfahrens herangezogen werden, da es sich hierbei im Vergleich zu den umfangreichen Zeitstudien in Kapitel 4.1 um vergleichsweise kurzzeitige Messungen mit geringerer Repräsentativität handelt.

Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt. Alle angegebenen Werte beziehen sich auf die reine Arbeitszeit (RAZ). Weitere Einzelheiten zu den Messungen sind in einer Diplomarbeit, die im Rahmen des vorliegenden Projekts durchgeführt wurde, dokumentiert (vgl. DECKER [14]).

5.2.2.1 Holzernte

Für die Untersuchung der Arbeitsbelastung bei der Holzernte (Durchforstung) eines jungen Bestandes (JD) wurden 282 Momentaufnahmen aus zwei Holzerntemaßnahmen ausgewertet. Die erste Untersuchung ergab für die Arbeitskraft einen Belastungsindex von $L=176$, in der zweiten Untersuchung lag sie bei $L=197$. Das ergibt einen Mittelwert für die Gesamtuntersuchung von $L=186$. Im Vergleich zu den übrigen Messwerten der Brennholzbereitstellung kann dieser Wert als relativ schwer eingestuft werden (vgl. hierzu auch Kapitel 5.2.5). Der höchste Teilwert wird beim Entasten ermittelt ($L=220$). Dieser Ablaufabschnitt hat mit 36% auch den größten zeitlichen Anteil bei der Holzernte. Die geringste Belastung ergibt sich mit $L=118$ beim "Gehen" zum nächsten Baum, der gefällt werden soll (Abb. 68).

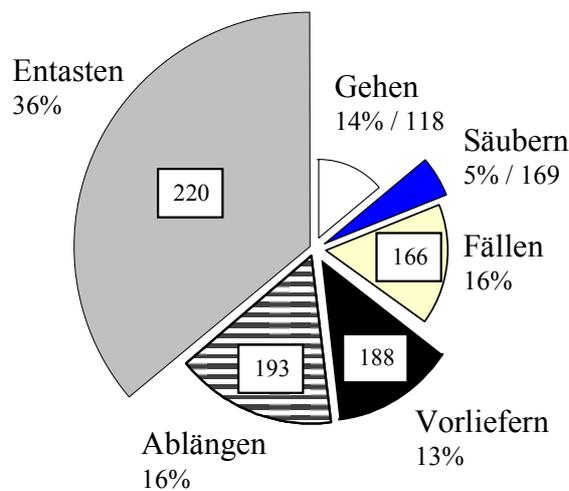


Abb. 68: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte bei der Holzernte (Durchforstung)

Der in Abb. 68 dargestellte Teilwert für den Abschnitt Entasten erscheint zunächst relativ hoch, auch im Vergleich zu Messungen, die aus der Literatur für ähnliche Teilarbeiten bekannt sind. Hierbei sei auf eine österreichische Untersuchung von FREI [19] verwiesen, der für das Entasten einen OWAS-Wert von $L=165$ angibt. Dieser Unterschied lässt sich jedoch durch die Tatsache erklären, dass die österreichischen Messungen in einem Hochwald (Altdurchforstung AD) durchgeführt wurden, bei dem im Gegensatz zur Holzernte im Jungbestand (Jungdurchforstung, JD) das zu entastende Material wegen des größeren Baumdurchmessers höher aufliegt, wodurch die Arbeiten in einer weniger gebeugten Körperhaltung erfolgen können. Zusätzlich können die Unterschiede durch eine möglicherweise unterschiedliche Körpergröße der Probanden und ihre unterschiedliche Professionalität (ggf. rüchenschonendere Arbeitsweise) zustande gekommen sein. Bei der Jungdurchforstung ist deshalb anzuraten, nicht, wie in der vorliegenden Untersuchung, das am Boden liegende Holz zu entasten, sondern es erhöht zu lagern, um so ein ergonomisches Arbeiten zu ermöglichen. Generell ist festzuhalten, dass die genannte Arbeit von FREI [19] wegen des andersartigen Untersuchungsobjektes (Hochwald statt junger Bestand) und zum Teil auch wegen der geringeren methodischen Zuverlässigkeit (es wurden keine Videobildsequenzen ausgewertet) nur begrenzt mit den vorliegenden Messungen vergleichbar ist und hier nur wegen der ansonsten generell fehlenden Vergleichsuntersuchungen für die Brennholzgewinnungsverfahren zur allgemei-

nen Orientierung genannt sein soll. Als weiteres Teilergebnis gibt FREI [19] für das Fällen einen Belastungsindex von $L=171$ an, hierbei besteht eine gute Übereinstimmung mit der vorliegenden Untersuchung, in der die Fällarbeit mit $L=166$ wegen der kleineren Baumdurchmesser geringfügig günstiger bewertet wird. Derartige Unterschiede liegen jedoch im Rahmen der üblichen Messwertschwankungen (vgl. hierzu Kapitel 5.2.3). Alle weiteren Ablaufabschnitte der österreichischen Untersuchung ($L=133$ für das Keilen und $L=125$ für Sonstige Verteilzeiten, SVZ) lassen sich nicht unmittelbar mit den hier gemessenen Werten vergleichen.

5.2.2.2 Spalten mit der Axt

Beim Axtspalten wurde die Arbeit zweier Probanden über jeweils zwei Stunden untersucht, so dass je Versuchsperson 248 Videobilder ausgewertet wurden. Der daraus berechnete Belastungsindex liegt bei $L=179$, wobei die Bandbreite der Ergebnisse der zwei Untersuchungen von $L=167$ bis $L=190$ reichte. Der Arbeitsablaufabschnitt "Holz ablegen" erwies sich hierbei als am stärksten belastend. Hierunter ist in diesem Fall das Auflesen vom Boden und das Werfen in eine nebenstehende Box oder auf einen daneben liegenden Haufen zu verstehen. Das ständige Bücken führt hierbei zu einer hohen Belastung. Insgesamt sind aber auch die anderen Ablaufabschnitte als eher belastend einzustufen (Abb. 69).

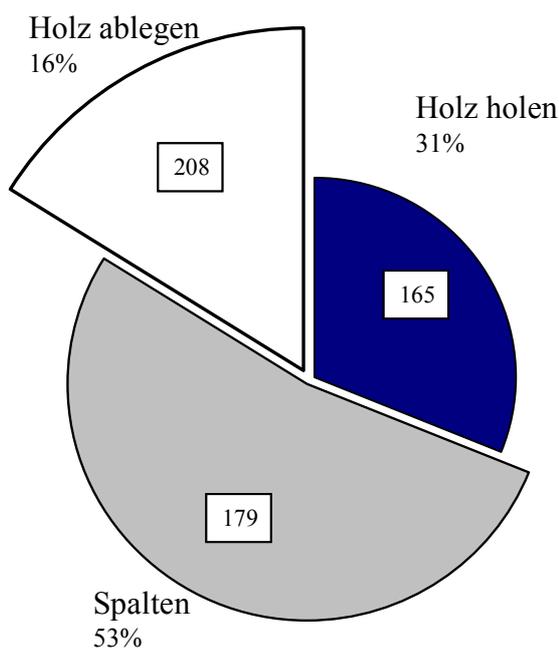


Abb. 69: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim Spalten mit der Axt

5.2.2.3 Senkrechtpalter

Insgesamt wurde beim Spalten mit Senkrechtpaltern eine Zeitspanne von 6,6 Stunden als Videofilm an drei verschiedenen Spaltern aufgezeichnet. Daraus wurden 823 gespeicherte Einzelbilder (Momentaufnahmen) herausgefiltert. Als Gesamtbelastungsindex für die Arbeiten am Senkrechtpalter errechnet sich ein Wert von $L=142$. Die Bandbreite liegt zwischen $L=121$ und $L=154$

(Abb. 70). Drei Probanden wurden eingesetzt. Bei zweien waren die Belastungsindizes mit $L=149$ bzw. $L=154$ eher wenig belastend, während der dritte sich mit nur $L=122$ hiervon etwas abhob. Zwei Gründe sind hierfür anzuführen: Zum einen war das dritte Spalterfabrikat mit einer besseren, weil beweglicheren Halterung des zu spaltenden Rundholzes ausgestattet, die eine optimale Positionierung der Hand erlaubt und zum anderen war der Proband mit 165 cm kleiner als die anderen beiden Probanden (180 cm bzw. 178 cm), wodurch er besser an die gegebene Gerätehöhe angepasst war und in einer aufrechteren Haltung während des Spaltvorgangs arbeiten konnte, zumal das Spalten hier mit 57% Arbeitszeitanteil dominierte.

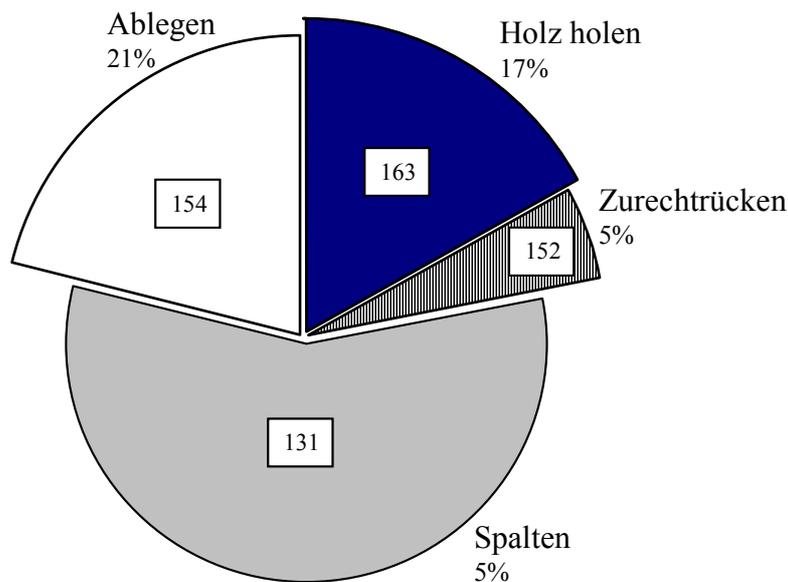


Abb. 70: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte im Verfahren "Senkrechtpalter"

5.2.2.4 Waagrechtspalter

In der vorliegenden Untersuchung wurden zwei Modelle von Waagrechtspaltern untersucht. Der Durchschnitt der verschiedenen Belastungsindizes wurde aus 541 Momentaufnahmen (entspricht 4,5 Stunden Beobachtungsdauer) berechnet, er liegt bei $L=117$. Die Extremwerte liegen bei $L=109$ bzw. $L=129$.

In dieser Studie war die Einteilung in einzelne Arbeitsablaufabschnitte schwierig, da sich die ausgewerteten Halbminutenbilder oftmals nicht zweifelsfrei einem bestimmten Abschnitt zuordnen ließen. Zur Arbeitsschwere in den einzelnen Arbeitsablaufabschnitten kann daher hier keine Aussage gemacht werden.

5.2.2.5 Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine

Die kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine ("Kleiner Spaltautomat") wurde in fünf Untersuchungen an zwei verschiedenen Fabrikaten bewertet. Der Durchschnitt der verschiedenen Belastungsindizes wurde aus 577 Momentaufnahmen (entspricht 4,6 Stunden Beobachtungsdauer)

berechnet, er liegt im Mittel bei $L=109$ (Abb. 71), wobei die einzelnen betrachteten Ablaufabschnitte des Verfahrens in einer Bandbreite von $L=100$ (z. B. Sägen) bis $L=113$ (Fördern) schwanken. Diese Werte können durchgehend als wenig belastend eingeordnet werden, wobei das Sägen und das Zurechtrücken sogar den niedrigstmöglichen OWAS-Wert annehmen können ($L=100$).

Ein scheinbarer Widerspruch ergibt sich aus der Tatsache, dass der Belastungsindex für den kleinen Spaltautomat, bei dem das Holz von Hand zugeführt werden muss, einen niedrigeren Wert einnimmt, als der Wert für den großen Spaltautomat (vgl. Kapitel 5.2.2.2), bei dem hauptsächlich nur die Maschine überwacht werden muss. Dies lässt sich aber dadurch erklären, dass die Bedienperson beim großen Spaltautomat neben den Steuerungsaufgaben auch noch Ablaufstörungen beheben muss, beispielsweise sind eingeklemmte Holzstücke zu lösen, was kurzzeitig zu sehr hohen Belastungen führt.

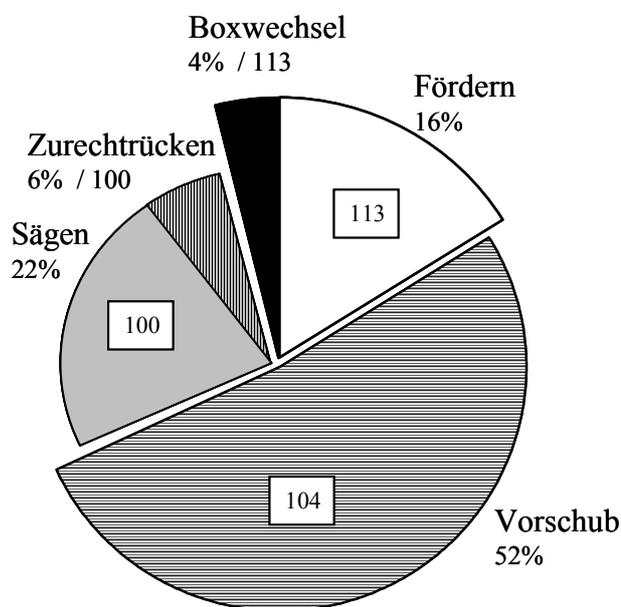


Abb. 71: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim kleinen Spaltautomaten

5.2.2.6 Große kombinierte Säge-Spaltmaschine

Bei der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine ("Großer Spaltautomat") wurden zwei verschiedene Geräte untersucht, wobei insgesamt 350 Momentaufnahmen (entspricht 2,8 Stunden Beobachtungsdauer) ausgewertet wurden. Die beiden untersuchten Maschinen zeigten unterschiedliche Ergebnisse. Während die Arbeit am Fabrikat 1 (Herkules II; Kretzer) zu einer Belastung von $L=111$ führte, liegt der Wert beim Fabrikat 2 (SSA D650; S&Ü) um 19 Punkte höher ($L=130$). Als Mittelwert für beide Verfahren ergibt sich ein OWAS-Wert von $L=118$, hierbei sind allerdings die Messungen an Fabrikat 1 stärker berücksichtigt, da diese Maschine zweimal untersucht und somit ein längerer Messzeitraum ausgewertet wurde. Eine Unterscheidung der einzel-

nen Arbeitsablaufabschnitte war bei den Messungen an den großen kombinierten Säge-Spaltmaschinen nicht möglich.

5.2.2.7 Brennholzkreissäge

Mit der Brennholzkreissäge wurde insgesamt ein 2-stündiger Arbeitsablauf als Videofilm aufgezeichnet, woraus 241 gespeicherte Einzelbilder ausgewertet wurden. Es kamen zwei Probanden an zwei verschiedenen Wippkreissägen zum Einsatz. Der berechnete mittlere Belastungsindex beträgt für das Arbeiten mit der Brennholzkreissäge $L=145$. Die Werte der beiden Probanden unterscheiden sich um 18 Punkte ($L=136$ und $L=154$). Wie in Abb. 72 zu sehen ist, teilt sich der Arbeitsablauf zu 29% in "Scheit holen" ($L=138$), zu 27% in "Sägen" ($L=147$) und zu 44% in "Scheit ablegen" ($L=149$) auf.

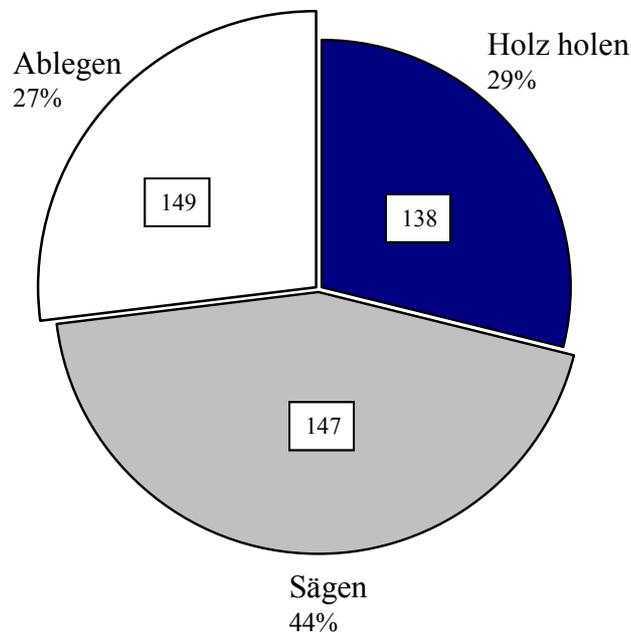


Abb. 72: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim Arbeiten mit der Brennholzkreissäge

5.2.2.8 Zubringen von Holz

Für das Zubringen von Holz zur weiteren Aufbereitung wurden insgesamt 364 Momentaufnahmen bewertet. Die Aufnahmen kamen vollständig bei den Arbeiten am Waagrechtspalter mit Rundholz zustande, sie sind aber prinzipiell auch relevant für andere Aufbereitungsverfahren. Der berechnete Belastungsindex für dieses Zubringen liegt bei $L=159$ und weist eine Bandbreite von $L=146$ bis $L=166$ auf, je nachdem, um welchen der zwei Probanden es sich handelte. Dabei sind die einzelnen Arbeitsablaufabschnitte sehr unterschiedlich in einer Bandbreite von $L=113$ für Warten bis $L=201$ für das manuelle Beladen des Gerätes mit Rundholz zu bewerten (Abb. 73). Ohne den Ablaufabschnitt "Warten" würde der Gesamtwert bei $L=176$ liegen. Das Ergebnis des Arbeitsablaufabschnittes "Beladen" unterscheidet sich je nach Art der Durchführung, d. h. der Belastungsindex liegt bei Verwendung eines Sappi bei $L=151$ und steigt bei manuellem Beladen

auf $L=201$. Dies zeigt deutlich, dass es sinnvoll ist, derartige Hilfsgeräte einzusetzen, um die Arbeitsbelastung zu mindern, auch wenn ein solcher Ablauf zunächst für den Arbeiter umständlich erscheinen mag.

Im beobachteten Verfahrensbeispiel wurde neben dem Holzzuführen auch das gespaltene Holz von der Ablage entfernt und auf einen Stapel geschichtet. Hierbei wäre die Arbeit nicht so belastend, wenn das Holz auf einer Höhe von Oberschenkel bis maximal Schulterhöhe aufgeschichtet würde. Im Normalfall, so auch bei dieser Untersuchung, wird es aber vom Boden bis auf Kopfhöhe gestapelt und erhält daher mit $L=171$ einen vergleichsweise hohen Belastungswert.

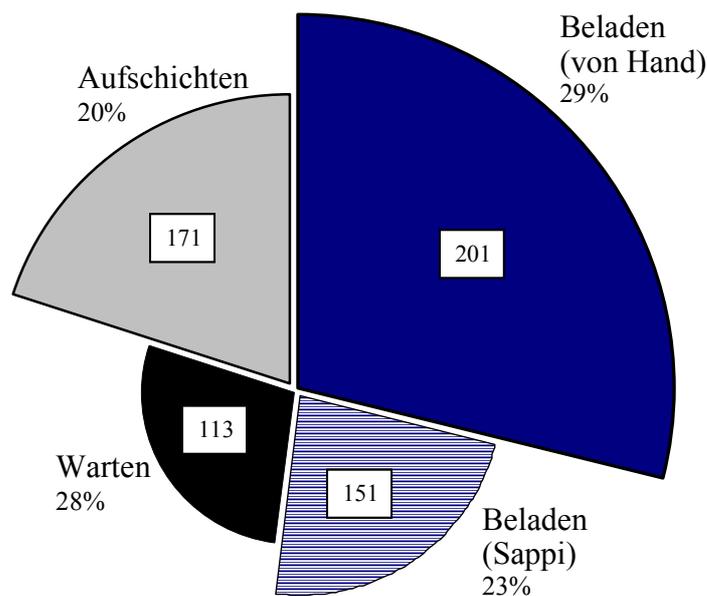


Abb. 73: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim Zubringen des Holzes

5.2.2.9 Schichten in Stapeln und Bündelhilfen

Insgesamt wurden 465 Momentaufnahmen (aus 4,2 Stunden Arbeitszeit) zum Stapeln und Binden des Scheitholzes zu Rundbündeln bewertet, wobei drei Probanden zum Einsatz kamen. Die berechnete Bandbreite des Belastungsindex für diese drei bewerteten Abläufe liegt zwischen $L=130$ und $L=148$ wobei ein Durchschnittswert von $L=140$ erzielt wurde. Die Arbeitsschwerebewertung und zeitliche Aufteilung der hierbei jeweils unterschiedenen vier Ablaufabschnitte ist in Abb. 74 dargestellt. Dabei hat das eigentliche Stapeln, also das Einschichten der Scheite in die Bündelhilfe, mit 52% den höchsten Anteil dieser Arbeit. Den zweithöchsten Anteil nimmt das Binden der Rundbündel ein. Das Zusammenzurren der Scheite mit einer Rätische vor dem Binden und das Kippen des fertigen Bündels aus der Bündelhilfe haben mit 7% bzw. 9% einen kleinen aber nicht zu vernachlässigenden Anteil am Gesamtverfahren. Der Anteil des Arbeitsablaufabschnittes "Stapeln" variiert mit dem Weg, über den die Scheite zur Bündelhilfe angeliefert werden müssen, und mit der Größe der zu erstellenden Bündel (0,5 Rm oder 1 Rm, vgl. hierzu Zeitstudien in Kapitel 5.1.3.8).

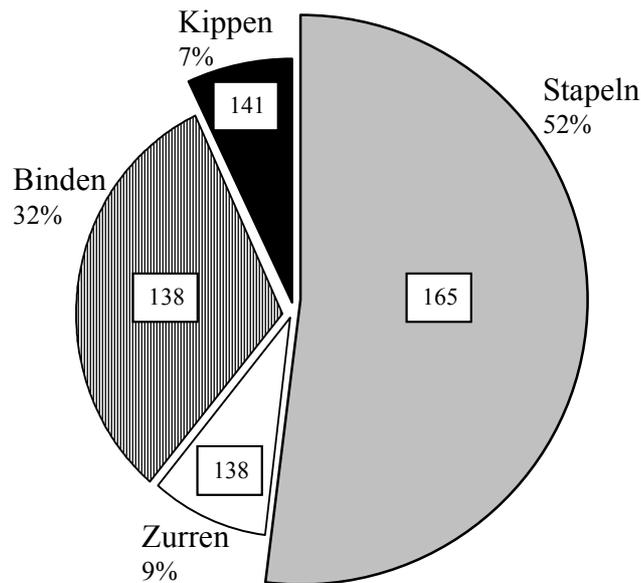


Abb. 74: Teil-Belastungsindizes L und Arbeitszeitanteile der Ablaufabschnitte beim Bündeln mit einer Bündelhilfe

In der Praxis kann der Belastungsindex für diese Arbeiten kaum durch eine bessere Arbeitsorganisation verbessert werden. Hierzu müssten die zu bündelnden Scheite an einer Stufe oder auf einer angehobenen Plattform abgelegt worden sein, damit die Arbeit bei der Aufnahme der Scheite weniger gebückt erledigt werden kann. Eine solche Verbesserung der ergonomischen Verhältnisse liegt jedoch selten vor, so dass der hier gemessene Wert von $L=165$ für das Stapeln alleine als typisch gelten kann. Dies bestätigt auch der im vorherigen Kapitel 5.2.2.8 gemessene Wert für das Stapeln alleine $L=171$. Somit ergibt sich für das Schichten ohne Bündelhilfe ein Mittelwert aus beiden Angaben von $L=168$.

Bei 33 cm-Scheiten, die vom Boden bis auf eine Höhe von einem Meter geschichtet werden, liegt der Belastungsindex aufgrund der gebeugten Haltung dagegen bei $L=250$. Dieser Wert ist extrem hoch. Er wurde anhand der Aufnahmen zur Bestimmung der Umrechnungsfaktoren bestimmt, bei denen das Holz in drei Reihen hintereinander in einen Stapelrahmen geschichtet wurde (vgl. Kapitel 4.4.2). Er dürfte in der Praxis, bei der das Holz höher und in einer Reihe an die Hauswand geschichtet wird nicht so hoch ausfallen.

5.2.3 Reproduzierbarkeit und Repräsentativität der Bestimmungsmethode nach OWAS

Zeitversetzte Bilderauswahl. Zur Feststellung der Reproduzierbarkeit wurde das Momentaufnahmeintervall in ausgewählten Teilstudien variiert. Die um 15 Sekunden zeitversetzte Bilderfolge führte zu gut reproduzierbaren Ergebnissen, mit $L=164$ zu $L=167$ beim "Spalten mit der Axt", $L=154$ zu $L=157$ beim "Spalten mit dem Senkrechtpalter" und $L=101$ zu $L=102$ beim "Spalten mit dem kleinen Spaltautomat" sind die Unterschiede marginal (Tab. 17). Der Variationskoeffizient liegt damit im Bereich von maximal 1%.

Tab. 17: *Vergleich der beiden Belastungsindizes (L) für dasselbe Verfahrensbeispiel, jedoch einmal mit und einmal ohne Zeitversatz der ausgewerteten Bilderfolgen*

Auswertebeispiel	Proband	Startzeit der Momentaufnahmen	L
Spalten mit der Axt	N	t = 0 s	167
	N	t = +15 s	164
Senkrechtpalter	K	t = 0 s	157
	K	t = +15 s	154
Kleiner Spaltautomat	D	t = 0 s	102
	D	t = +15 s	101

Verdopplung der Bilderfrequenz. Zur Verifizierung der Methode wurde die Anzahl der Momentaufnahmen je Zeitfolge in ausgewählten Teilstudien verdoppelt, indem die Intervallabstände halbiert wurden. Auch ein solchermaßen erhöhter Datenumfang für dieselbe Untersuchung zeigt nur eine geringe Wirkung auf das Ergebnis. Die Unterschiede liegen bei vier bis maximal sieben Indexpunkten (Tab. 18).

Tab. 18: *Vergleich der beiden Belastungsindizes (L) für dasselbe Verfahrensbeispiel, jedoch einmal mit 15- und einmal mit 30-Sekundenintervallen für die ausgewerteten Bilderfolgen (d.h. doppelte bzw. halbe Bilderanzahl)*

Auswertebeispiel	Proband	Momentaufnahmeintervalle	L
Spalten mit der Axt	N	30 s	167
	N	15 s	163
Senkrechtpalter	K	30 s	157
	K	15 s	153
Kleiner Spaltautomat	D	30 s	102
	D	15 s	109

Für diese Unschärfen lassen sich verschiedene Gründe anführen. Zum einen rechnet das Programm WinOWAS ausschließlich mit ganzen Zahlen für die prozentuale Verteilung der verschiedenen Maßnahmeklassen, dabei wird ab 0,5 Prozentpunkten aufgerundet. Für das Ergebnis des Belastungsindex L kann sich hierdurch eine Abweichung von bis zu fünf Punkten Unterschied ergeben, so dass durch Rundungsfehler mit einem entsprechenden "Rauschen" zu rechnen ist. Es verdeutlicht, dass einer Abweichung für den Belastungsindex von sieben Punkten keine besondere Bedeutung beigemessen werden kann und die in diesem Intervall ermittelten Ergebnisse als gleich angesehen werden können. Mit 30 Sekunden lag das Aufnahmeintervall weit unter der Dauer des jeweils kürzesten Arbeitsablaufabschnitts der verschiedenen Verfahren, so dass die Verkürzung des Aufnahmeintervalls auf 15 Sekunden erwartungsgemäß keine Veränderung des Belastungsindex ergab.

5.2.4 Zusammenstellung und -Vergleich

Vergleich einzelner Teilverfahren. Die Indizes der Arbeitsbelastung für "Durchforsten", "Spalten mit der Axt", und "Zubringen" sind mit $L=186$, $L=179$ und $L=176$ relativ hoch. Bei den Verfahren "Brennholzkreissäge", "Senkrechtpaltes" und "Bündelhilfe" liegen sie mit ca. $L=140$ im mittleren Bereich, während die Werte der Verfahren "Waagrechtpaltes" und "Spaltautomat" mit Werten von $L=109$ bis 118 erwartungsgemäß am niedrigsten sind (Abb. 75). Eine Bewertung und Zuordnung dieser Messwertebandbreite erfolgt in Kapitel 5.2.5.

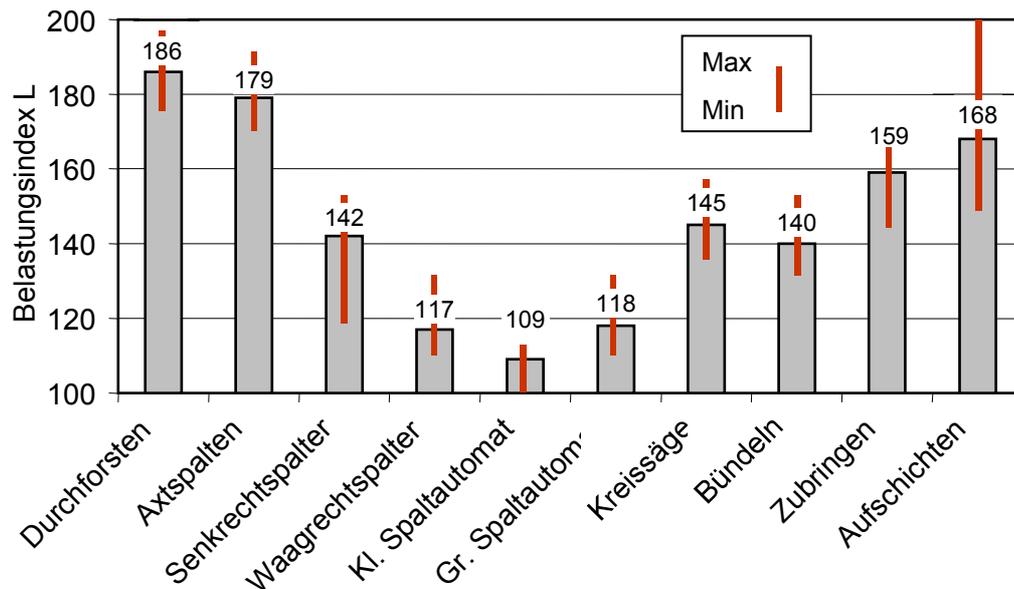


Abb. 75: Belastungsindex L für die verschiedenen möglichen Arbeiten (Teilverfahren) einer Scheitholzbereitstellungskette (Ursprung der Y-Achse bei 100, da hier der niedrigste OWAS-Wert liegt).

Vergleich zwischen OWAS- und Umfrageergebnissen. Die in der Umfrage (Kapitel 5.2.1) festgestellte subjektive Einschätzung der Befragten hinsichtlich der Belastungen bei der Scheitholzbereitstellung stimmt gut überein mit der Bewertung der Belastung mit Hilfe der OWAS-Methode, das zeigt Abb. 76. In der Darstellung wurde dabei der Belastungsindex beim Verfahren "Kleiner Spaltautomat" als Referenzwert 100% festgelegt. Um einen Vergleich der beiden Untersuchungen zu ermöglichen, wurde der relative Unterschied zum diesem Referenzverfahren für die übrigen Verfahren errechnet.

Die hierbei festzustellende weitgehende Übereinstimmung der Tendenzen wird nur beim Verfahren "Spalten mit dem großen Spaltautomat" durchbrochen (Abb. 76). Diese auftretende Abweichung ist dadurch erklärbar, dass das Erläuterungsbild, das dem Umfragebogen beigelegt war, für dieses Verfahren nur eine an der Steuerungseinheit der Maschine stehende Bedienperson zeigte, so dass die zusätzlichen Aufgaben, die diese Person noch erfüllen musste (z. B. das Lösen von verklemmten Holzstücken) nicht erkennbar und damit auch nicht bewertbar waren. Hierin besteht ein wesentlicher Unterschied zur OWAS-Methode, bei der sämtliche Arbeitsabläufe des Bedieners anteilig beurteilt werden.

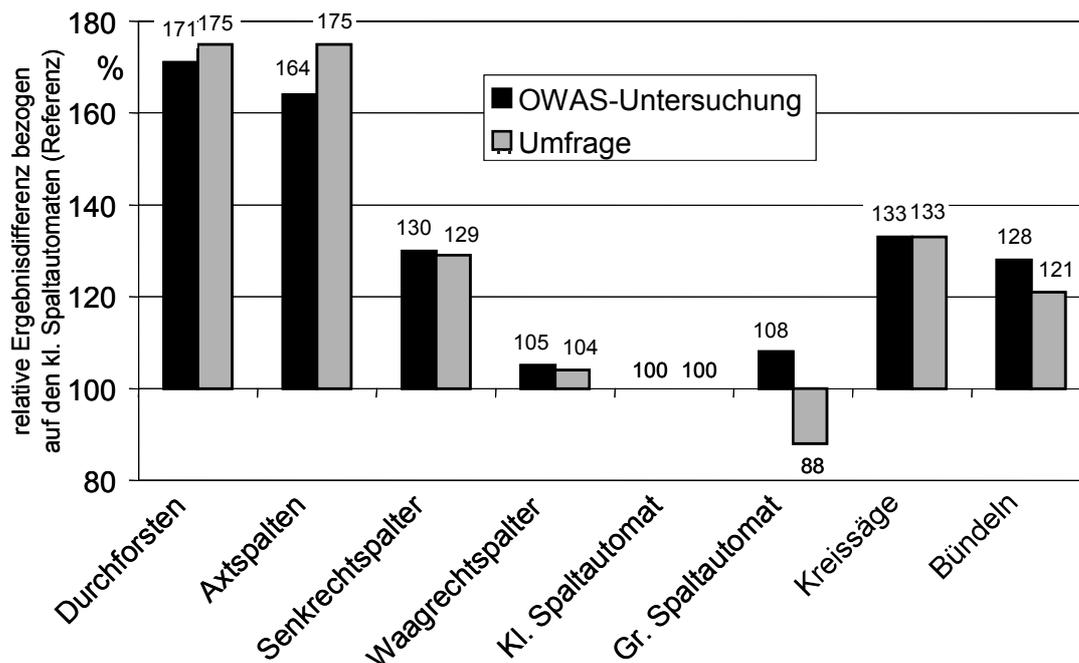


Abb. 76: Vergleich der Belastungsindizes nach OWAS mit den Ergebnissen der Befragung, bezogen auf eine einheitliche Bezugsbasis (hier: kleiner Spaltautomat = 100%)

5.2.5 Versuch einer Klassifizierung der Belastungsindizes

Die in Kapitel 5.2.4 dargestellte Messwerte-Bandbreite reicht von $L=109$ bis $L=189$ (vgl. Abb. 75), wobei in einzelnen Verfahrensabschnitten, wie dem Beladen einzelner Maschinen von Hand, auch Durchschnittswerte von mehr als $L=200$ vorkommen können. Es kann angenommen werden, dass OWAS-Mittelwerte über $L=200$ wegen der notwendigen Ruhe- und Erholungspausen zwischen den besonders stark belastenden Bewegungsabläufen generell nur relativ selten dauerhaft vorkommen, zumal selbst bei der gemeinhin als besonders anstrengend geltenden Durchforstungsarbeit Maximalwerte bis $L=200$ erzielt werden. Das gilt umso mehr, als mit der OWAS-Methode eine eventuelle sitzende Tätigkeit nicht günstiger bewertet würde als eine stehende, obgleich in der Realität hier zweifellos größere Belastungsunterschiede bestehen. Die optimale Haltung eines Arbeitsplatzes ist nach OWAS lediglich als eine aufrechte Arbeitsposition festgelegt (keine gebeugte Haltung), bei der beide Arme unterhalb der Schulterhöhe tätig sind. Sie ergibt den niedrigsten Belastungsindex von $L=100$.

Angesichts dieses Startwertes und der durch die Mittelwertbildung praktisch zwangsläufig nach oben hin begrenzten Bandbreite des Indexes wird in Tab. 19 ein Vorschlag für eine Interpretation und Klassifizierung der gemessenen OWAS-Mittelwerte gemacht. Die Tabelle charakterisiert den Bereich von $L=100$ bis $L>200$ mit einer Bandbreite von "kaum belastend" bis "sehr belastend". Diese Einschätzung entspricht auch der subjektiven Erfahrung der Versuchsansteller. Sie wird aber vor allem durch die hierzu durchgeführte Befragung (vgl. Kapitel 5.2.1) gestützt. Darin hatte sich gezeigt, dass beispielsweise die besonders belastungsintensive Durchforstung von den Befragten überwiegend mit nahezu dem Maximalwert ("sehr schwer") eingestuft wurde (4,4 von maximal 5 Bewertungspunkten, vgl. Abb. 67).

Tab. 19: *Klassifizierungsvorschlag für eine Beurteilung und Interpretation der gemessenen Belastungsindizes bei der Brennholzbereitstellung*

Bereiche des Belastungsindex L	Allgemeine Klassifizierung (Interpretation)
100 – 120	kaum belastend
121 – 140	wenig belastend
141 – 160	eher wenig belastend
161 – 180	eher belastend
180 – 200	belastend
> 200	sehr belastend

5.3 Ergebnisse zu den Energieverbrauchsmessungen

Die durchgeführten Energieverbrauchsmessungen wurden parallel zu den ebenfalls durchgeführten Arbeitszeitmessungen durchgeführt, daher sind die nachfolgend vorgestellten Versuche in der gleichen Weise bezeichnet, wie die Zeitstudien in Kapitel 5.1. Allerdings war nicht in allen Fällen eine Energieverbrauchsmessung möglich, so dass auch nicht zu jeder Zeitstudie Daten vorliegen. Sämtliche Erläuterungen zu den gegebenen Rahmenbedingungen der Messungen (Verfahren, Maschinenkenndaten, Einsatzort etc.) sind im Anhang 10.1 zusammengestellt. Das methodische Vorgehen wird im Kapitel 4.3 vorgestellt.

Bei den Ergebnissen handelt es sich entweder um Kraftstoff- oder um Stromverbrauchsmessungen, je nach Antriebsart für das jeweilige Gerät. Da die Aufbereitungsform bei den einzelnen Studien unterschiedlich war (verschiedene Längen, Lagerarten etc., vgl. Kapitel 4.1), sind sämtliche Messwerte einheitlich auf einen Festmeter bezogen, um einen Vergleich des spezifischen Energieverbrauchs zwischen den einzelnen Studien zu ermöglichen. Für die dadurch gegebenenfalls notwendigen Umrechnungen wurde auf die eigenen Umrechnungsfaktoren zurückgegriffen, die in der vorliegenden Untersuchung ebenfalls bestimmt worden waren (vgl. Kapitel 5.8.1). Zur besseren Anwendbarkeit der Ergebnisse in der Praxis werden die Werte des Energieverbrauchs zusätzlich auch auf ein einheitliches Scheitholzvolumenmaß (Raummeter) umgerechnet, wobei hierfür einheitlich die Aufbereitungsform der gespaltenen geschichteten Meterholzscheite gewählt wurde. Um die verbrauchte Energiemenge von Verbrennungsmotoren mit denen der Elektromotoren zu vergleichen, wird der Verbrauch von Dieselmotoren zusätzlich in Kilowattstunden angegeben (1 Liter Diesel \equiv 10 kWh). Vereinfachend wird dabei auf eine Berücksichtigung der unterschiedlichen Primärenergieaufwendungen, die für die Bereitstellung dieser Endenergieträger zuvor erforderlich sind, verzichtet. Eine entsprechende Berücksichtigung erfolgt aber in der Prozesskettenanalyse in Kapitel 5.9.7.

5.3.1 Kraftstoffverbrauch der Motorsäge bei der Holzernte

Bei der Durchforstung wurde der Kraftstoffverbrauch in einem Fichten-Eschen Mischbestand (vgl. Teilstudie 1 im Anhang 10.1) gemessen. Die verwendete Motorsäge (Stihl 020 mit 1,6 kW Motorleistung) benötigt als Kraftstoff ein Zweitakt-Gemisch. Es ist mit einem Kraftstoffverbrauch von ca. 0,3 Litern Benzingemisch je Festmeter Holz zu rechnen (Tab. 20). Bei einem Heizwert für Benzin von 8,77 Kilowattstunden je Liter entspricht dies einem Energieverbrauch von ca. 2,6 kWh/Festmeter. Daraus errechnet sich ein Verbrauch von 1,4 kWh pro Raummeter (Meterholz, gespalten geschichtet). Zusätzlich wurde der Verbrauch an Verlustschmieröl für die Sägekette erfasst. Er lag bei 0,05 l/Fm bzw. 0,03 l/Rm.

Tab. 20: *Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchsmessung für die Motorsäge bei der Holzernte (Jungdurchforstung)*

Teilstudie	Baumarten	spezifischer Kraftstoffverbrauch	
		in l/Fm	in l/Rm ^a
Holzernte Teilstudie 1	Fichte 75% Esche 25%	0,30	0,16

^a Umrechnung der Raummaße nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.8.1); hier: Meterscheite, gespalten, gestapelt; Umrechnungsfaktor ist ein Mittelwert aus den Werten für Buche und Fichte (hier: 1,89)

5.3.2 Stromverbrauch beim kleinen Senkrechtspalter

Der spezifische Stromverbrauch des kleinen Senkrechtspalters ist bei Fichtenholz mit 1,8 kWh/Fm höher als bei Buchenholz mit 1,37 kWh/Fm (Tab. 21). Dies ist im wesentlichen auf den höheren Wert der Teilstudie KS 1 zurückzuführen. Mit durchschnittlich 0,64 kW mittlerer Leistungsaufnahme werden nur ca. 21% der vom Hersteller angegebenen maximalen Leistungsaufnahme von 3 kW genutzt. Bei den Messungen handelt es sich durchweg um denselben Spalter und um dieselbe Arbeitskraft. Die Bezeichnung der Studien ist analog zu den Zeitstudien (Kapitel 4.1).

Tab. 21: *Gemessener Stromverbrauch beim Spalten mit dem kleinen Senkrechtspalter*

Teilstudie	Baumart	Mittlere Leistungsaufnahme (kW)	Spezifischer Stromverbrauch	
			in kWh/Fm	in kWh/Rm ^a
KS 2	Buche	0,53	1,12	0,57
KS 4	Buche	0,63	1,21	0,61
KS 6	Buche	0,72	1,79	0,90
Mittelwerte:	Buche	0,63	1,37	0,69
KS 1	Fichte	0,53	2,30	1,27
KS 3	Fichte	0,68	1,35	0,75
KS 5	Fichte	0,70	1,76	0,98
Mittelwerte:	Fichte	0,64	1,80	1,00

^a Umrechnung der Raummaße nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.8.1); hier: Meterscheite, gespalten, gestapelt

5.3.3 Dieselverbrauch beim großen Senkrecht- und Waagrechtspalter

In Tab. 22 sind die Ergebnisse der Dieseldieselkraftstoff-Verbrauchsmessungen zusammengestellt, die beim Spalten mit den großen Senkrecht- und Waagrechtspaltern (GS- und WS-Studien) durchgeführt wurden. Die Leistungen der Schlepper waren im einzelnen wie folgt:

- GS 1 und 2: 57 kW (78 PS),
- GS 3: 55 kW (75 PS)
- WS 1: 50 kW (68 PS).

Beim Waagrechtspalter ist der spezifische Energieverbrauch am geringsten. Dies ist zum einen auf den geringeren Verbrauch des Schleppers zurückzuführen, zum anderen lag hier aber auch eine deutlich effizientere Arbeitsgestaltung vor, so dass insbesondere durch die höhere Produktivität (vgl. Kapitel 5.2.2.4) ein günstigerer spezifischer Verbrauchswert zustande kam. Die Rahmenbedingungen der Messungen sind in den Verfahrensbeschreibungen in Anhang 10.1 zusammengestellt.

Tab. 22: *Ergebnisse der Dieselkraftstoff(DK)-Verbrauchsmessung mit den großen Spaltern. GS großer Senkrechtspalter, WS Waagrechtspalter*

Teilstudie	Baumart	DK-Verbrauch (l/h)	Spezifischer DK-Verbrauch	
			in l/Fm	l/Rm ^a
GS 2	Buche	2,30	1,54	0,78
GS 1	Fichte	2,37	1,38	0,77
GS 3	Fichte	1,72	0,98	0,54
WS 1	Fichte	1,21	0,51	0,28

^a Umrechnung der Raummaße nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.8.1); hier: Meterscheite, gespalten, gestapelt

In Tab. 23 wird der Dieselkraftstoffverbrauch aus Tab. 22 in kWh umgerechnet dargestellt, um ein Vergleichbarkeit des Endenergieverbrauchs von Kraftstoffen und elektrischem Strom zu ermöglichen. Zur Umrechnung wurde der Faktor 10 verwendet (1 l Dieselkraftstoff \equiv 10 kWh). Zusätzlich sind in Tab. 23 nur die Werte der Stromverbrauchsmessung aus der Studie GS 6 genannt.

Für den Anwender eines Holzspalters ergibt sich aus den Ergebnissen in Tab. 23, dass ein elektrischer Antrieb, sofern dieser aufgrund eines vorhandenen Stromanschlusses möglich ist, wegen des geringeren spezifischen Verbrauchs die günstigere Energiequelle darstellt, zumal sich die Spalter der GS-Studien zwar bei der Antriebsart, ansonsten aber wenig unterscheiden. Bei einem Preis von 1 €/l Dieselkraftstoff errechnet sich zwar mit 0,10 €/kWh ein relativer Endenergie-Preisvorteil gegenüber Strom (ca. 0,25 €/kWh), durch den deutlich höheren Dieselverbrauch wird dieser aber mehr als ausgeglichen. Beispielsweise betragen die Energiekosten selbst für den Waagrechtspalter mit 0,50 €/Fm noch mehr als das 5-fache des stromangetriebenen Prozesses (ca. 0,10 €/kWh), sie steigen auf mehr als das 15-fache beim Senkrechtspalter in der Studie GS 2 (1,50 €/Fm). Die Rahmenbedingungen der Messungen sind in den Verfahrensbeschreibungen in Anhang 10.1 zusammengestellt.

Tab. 23: *Energieverbrauch bei den großen Senkrecht- und Waagrechtspaltern umgerechnet auf kWh (1 Liter Diesel \equiv 10 kWh)*

Teilstudie	Baumart	Energieträger	Mittlere Leistungsaufnahme (kW)	Spezifischer Energieverbrauch	
				kWh/Fm	in kWh/Rm ^a
GS 6	Buche	Strom	0,89	0,39	0,20
GS 2	Buche	Dieselmotorkraftstoff	23,0	15,4	7,78
GS 1	Fichte	Dieselmotorkraftstoff	23,7	13,8	7,67
GS 3	Fichte	Dieselmotorkraftstoff	17,2	9,8	5,44
WS 1	Fichte	Dieselmotorkraftstoff	12,1	5,1	2,83

^a Umrechnung der Raummaße nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.8.1); hier: Meterscheite, gespalten, gestapelt

5.3.4 Dieselmotorkraftstoffverbrauch bei der kombinierten Säge-Spaltmaschine

Da Eingriffe in die Starkstromverkabelung für eine Verbrauchsmessung hier nicht durchgeführt werden konnten, handelt es sich bei den beiden gemessenen kombinierten Säge-Spaltmaschinen nur um dieselmotorkraftstoffbetriebene Geräte. Tab. 24 zeigt Ergebnisse dieser Verbrauchsmessungen. Auf Grund der vergleichsweise uneffektiven Arbeitsgestaltung (vgl. Kapitel 5.1.3.5) sind diese Werte jedoch nicht ohne weiteres verallgemeinerungsfähig. Sie zeigen jedoch, dass mit zunehmendem Mechanisierungsgrad im Vergleich zu den großen Senkrecht- und Waagrechtspaltern (Tab. 23) auch nennenswerte Energieeffizienzsteigerungen verbunden sind, zumal hier die beiden Arbeitsgänge Sägen und Spalten gemeinsam erledigt werden. Die Rahmenbedingungen der Messungen sind in den Verfahrensbeschreibungen in Anhang 10.1 zusammengestellt.

Tab. 24: *Gemessener Dieselmotorkraftstoff(DK)-Verbrauch bei kombinierten Säge-Spaltmaschinen*

Teilstudie	Baumart	DK-Verbrauch (l/h)	Spezifischer DK-Verbrauch	
			kWh/Fm	kWh/Rm ^a
KK 3 & 4	Fichte	8,77	5,53	3,07
GK 3	Fichte	9,95	2,03	1,13

^a Umrechnung der Raummaße nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.8.1); hier: Meterscheite, gespalten, gestapelt

5.3.5 Stromverbrauch beim Einsatz der Brennholzkreissäge

Bei der Stromverbrauchsmessung des Ablängens mit der Brennholzkreissäge wurden zwei unterschiedliche Ausgangssortimente verarbeitet. Bei den Teilstudien KR 2 und 3 handelte es sich um ungespaltene Meterstücke und bei den Teilstudien KR 1, 4 und 5 um gespaltene Meterscheite (siehe Tab. 25). Wegen der größeren Schnittflächen war bei den ungespaltenen Ausgangssortimenten ein größerer Energieverbrauch als bei den gespaltenen erwartet worden. Dies konnte jedoch nicht bestätigt werden. Dagegen liegt der um ca. 31% höhere spezifische Stromverbrauch beim Ablängen des härteren Buchenholzes verglichen mit dem weicheren Fichtenholz im Rahmen

der Erwartungen. Die Rahmenbedingungen der Messungen sind in den Verfahrensbeschreibungen in Anhang 10.1 zusammengestellt.

Tab. 25: *Ergebnisse der Stromverbrauchsmessung beim Ablängen von Meterscheiten auf 33 cm Scheite mit der Brennholzkreissäge*

Teilstudie	Baumart	Aufbereitungsform	Mittlere Leistungsaufnahme (kW)	Spezifischer Stromverbrauch	
				kWh/Fm	kWh/Rm ^a
KR 2	Fichte	ungespalten	1,13	0,66	0,37
KR 3	Buche	ungespalten	1,17	0,84	0,42
KR 4	Fichte	gespalten	1,35	0,56	0,31
KR 5	Buche	gespalten	0,91	0,83	0,42
KR 1	Fichte	gespalten	1,07	0,69	0,38
Mittelwert:	Fichte	beides	1,18	0,64	0,35
Mittelwert:	Buche	beides	1,04	0,84	0,42

^a Umrechnung der Raummaße nach eigenen Umrechnungsfaktoren (vgl. Kapitel 5.8.1); hier: Meterscheite, gespalten, gestapelt

5.3.6 Tatsächliche Leistungsaufnahme elektrisch betriebener Geräte

Am Beispiel der Kreissäge lassen sich die Verhältnisse bei der Leistungsaufnahme elektrisch betriebener Geräte verdeutlichen. Im Schnitt lag die verwendete Leistung bei der Kreissäge, deren Motor eine Nennleistung von 4,0 kW aufwies (vgl. Anhang 10.1) bei 1,11 kW (siehe Tab. 25; Mittelwert aus Buche und Fichte). Dies ergibt einen mittleren Auslastungsfaktor von 0,28. Der Faktor lässt sich durch die längeren Leerlaufzeiten, die solche Geräte im Einsatz aufweisen, erklären; sie entstehen beim Holen und Ablegen des Holzes. Außerdem wird auch unter Last nicht immer die volle Leistung benötigt.

Als weiteres Beispiel können die Ergebnisse vom Spalten mit dem kleinen Senkrechtpalter herangezogen werden, hier lag die elektrische Leistungsaufnahme bei 0,64 kW (siehe Tab. 21). Bei einer Nennleistung von 3,0 kW errechnet sich ein Auslastungsfaktor von 0,21. Beim großen Senkrechtpalter ergab die Messung der Leistungsaufnahme einen Wert von 0,89 kW (siehe Tab. 23) was einen Auslastungsfaktor von 0,22 ergibt (maximale Nennlast: 4,0 kW). Im Mittel kann somit beim Sägen und Spalten von einer maximal ca. 25%-igen Ausschöpfung der Maximalleistung ausgegangen werden.

Diese Berechnungen erlauben eine Abschätzung der mittleren Leistungsaufnahme bei den übrigen elektrisch betriebenen Geräten, die – wegen der hierfür erforderlichen Eingriffe in die Starkstromelektrik – nicht im Rahmen der Untersuchung direkt gemessen werden konnten. Es handelt sich hierbei um zwei der drei kombinierten Sägespalmmaschinen. Der oben genannte mittlere Auslastungsfaktor von 0,25 führt bei den kleinen kombinierten Maschine bei einer maximalen elektrischen Leistung von 7,5 kW zu einer tatsächlichen Leistungsaufnahme von 1,88 kW. Bei der großen elektrisch betriebenen kombinierten Maschine lag die maximale Leistung bei 40 kW, so dass hier von einer mittleren tatsächlichen Leistungsaufnahme von 10 kW ausgegangen werden kann.

Diese solchermaßen abgeschätzten Werte werden auch in den Berechnungen zum aggregierten Gesamtenergieeinsatz im Rahmen der Prozesskettenanalyse verwendet (vgl. Kapitel 5.9.5).

5.4 Trocknungsverlauf bei der Lagerung

5.4.1 Jahreszeitliche Einflüsse

Bei im Winter abgelegtem frisch geschnittenem Meterscheitholz setzt die Trocknung schon unmittelbar nach Lagerbeginn ein, obgleich die Trocknungsbedingungen noch relativ ungünstig sind. Im Frühjahr kommt es zu einer Beschleunigung der Trocknung (gemessen in Wassergehaltsprozenten), die dann mit Zunahme der Bindungskräfte für die verbleibende Restfeuchte bei weiter verbesserten Trocknungsbedingungen im Sommer abflacht. Dieser charakteristische Verlauf ist in Abb. 77 dargestellt. Dabei handelt es sich um eine besonders häufige Lagervariante, bei welcher der Holzstoß im Freien aufgebaut ist und vor Niederschlägen von oben durch eine Abdeckung geschützt ist. Unter den beschriebenen Bedingungen werden hier schon bis zum Sommer nach ca. 6-monatiger Lagerung ofenfertige Trocknungszustände erreicht. Das gilt für alle drei untersuchten Holzarten Buche, Fichte und Kiefer (Abb. 77). Allerdings ist zu erwähnen, dass es sich im Jahr 2003 um einen besonders trockenen Sommer handelte (vgl. Kapitel 5.4.2). Außerdem waren die Wassergehalte der einzelnen Baumarten zu Trocknungsbeginn holzartenbedingt nicht ganz einheitlich, sie wiesen Unterschiede von ca. 5 Prozentpunkten auf.

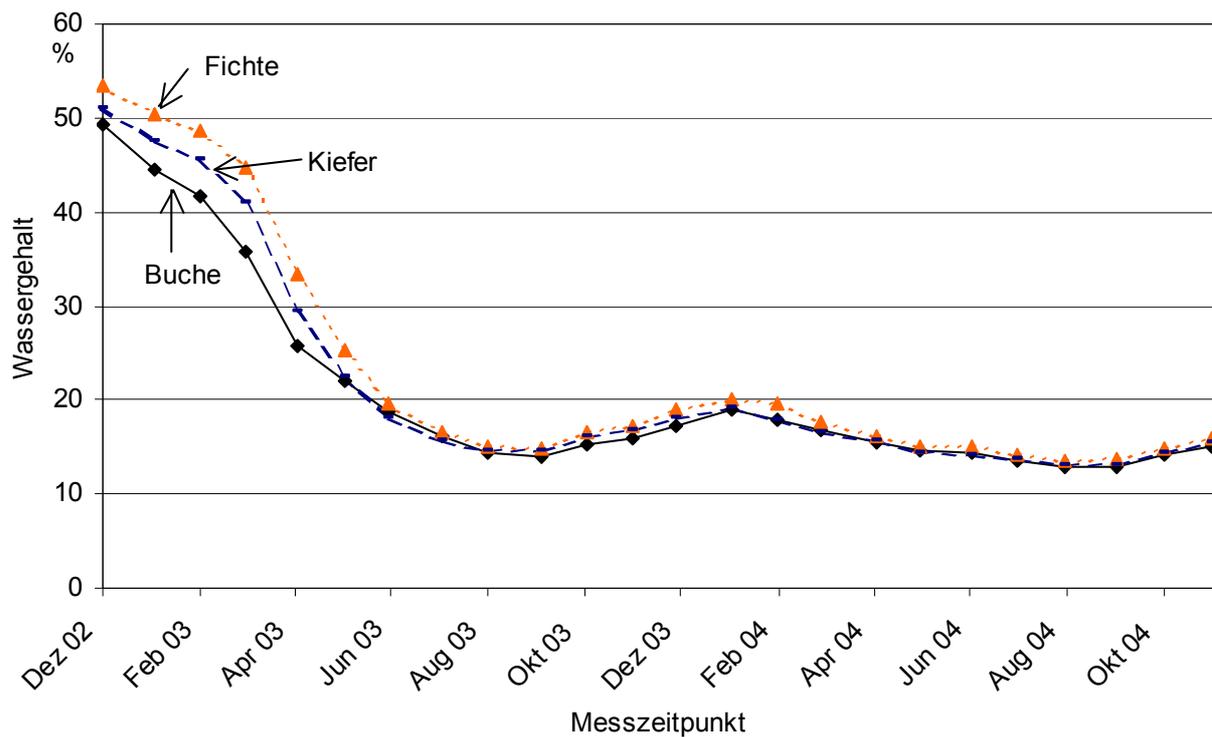


Abb. 77: *Wassergehaltsverlauf bei der Lagerung der verschiedenen Holzarten. Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising*

Im weiteren Verlauf ab Ende September steigt der Wassergehalt im Holz bis Januar wieder leicht an auf nahezu 20%. Auch hierin besteht Übereinstimmung bei den untersuchten Holzarten. Im zweiten Jahr folgt die erneute Abtrocknung entsprechend der Gleichgewichtsfeuchte, die sich zwischen dem Trocknungsgut und der Atmosphäre einstellt. Allerdings ist die dann erreichte Endfeuchte noch mal um ca. einen Prozentpunkt geringer als im ersten Jahr, obgleich es sich in 2004

um einen deutlich feuchteren Sommer handelte (siehe auch Kapitel 5.4.3). Auf Trockenmasseverluste durch biologischen Abbau kann diese zusätzliche Abtrocknung nicht zurückgeführt werden, da in den Werten in Abb. 77 eine Korrektur der Wiegungen um die Verluste bereits enthalten ist (zur Verlustkorrektur vgl. Kapitel 5.6).

Trotz weitgehender Übereinstimmung sind zwischen den Baumarten auch Unterschiede im Trocknungsverlauf zu erkennen. In den Wintermonaten Dezember bis Februar 2003 verlor die Buche am schnellsten ihre Feuchtigkeit, um nach vier Monaten Lagerungszeit im März mit 35% Wassergehalt einen Vorsprung im Trocknungsverlauf gegenüber der Kiefer mit 41% und der Fichte mit 45% Wassergehalt zu erreichen. Ab April werden bei allen Baumarten höchste Trocknungsraten von monatlich bis zu 90 Liter pro Raummeter erreicht (siehe unten: Abschnitt Trocknungsraten). Bis Juni wird der Trocknungsvorsprung der Kiefer und Buche von der Fichte wieder eingeholt (Abb. 77).

Die in Abb. 77 dargestellten Ergebnisse zeigen deutlich, dass für die hier gegebenen Trocknungsbedingungen eine Lagerdauer von einem Jahr ausreicht, um den für eine optimale Verbrennung von Scheitholz geforderten lufttrockenen Zustand (bis 20% Wassergehalt) zu erreichen. Das wird auch durch die Ergebnisse für den zweiten Lagerversuch mit Lagerbeginn im November 2003 bestätigt (vgl. hierzu Kapitel 5.4.2). Das Buchenholz trocknet zwar in den Sommermonaten ein wenig langsamer als Fichten- oder Kiefernholz, dies wird aber durch ein besseres Trocknungsverhalten in den Wintermonaten und einen besseren Startwert für den Wassergehalt im waldfrischen Zustand ausgeglichen. In absoluten Zahlen ausgedrückt wäre allerdings das Buchenholz gegenüber der Fichte oder Kiefer bei gleichem Startwert sogar leicht im Nachteil: mit 45% Wassergehalt enthält ein Raummeter aus gespaltenen Meterscheiten frischen Buchenholzes 280 Liter Wasser, ein Raummeter mit 50% Wassergehalt Fichtenholz dagegen nur 240 Liter. Zur vollständigen Abtrocknung auf einen Wert von 15% Wassergehalt sind somit bei Buchenholz 218 Liter abzutrocknen und bei Fichtenholz 198 Liter Wasser.

Trocknungsraten. Da sich am zeitlichen Verlauf der Wassergehalte die tatsächlich abgegebene Wassermasse je Volumeneinheit und damit die Trocknungseffizienz nicht abschätzen lässt, soll nachfolgend die tatsächliche monatliche Gewichtsveränderung als Trocknungsrate mit absoluten Zahlen dargestellt werden. Damit lässt sich das passive Trocknen von Scheitholz stärker zeitlich differenziert charakterisieren. Auch für diese Darstellung wird wieder die in Abb. 77 dargestellte Lagervariante mit abgedeckten Scheitholzbündeln (hier exemplarisch nur für Fichte und Buche) gewählt, wobei eine Beschränkung auf eine einjährige Lagerdauer vorgenommen wird.

Abb. 78 zeigt die Trocknungsraten während des ersten Lagerversuchs von Dezember 2002 bis Dezember 2003. Darin wird ersichtlich, dass das Buchenholz über die Wintermonate Januar bis März mit durchschnittlich 53 l pro Rm und Monat mehr Feuchtigkeit als die Fichte mit durchschnittlich 34 l pro Rm und Monat verliert. Im April ist die Trocknungsrate bei beiden Baumarten am höchsten (Buche: monatlich 80 l/Rm, Fichte: monatlich 93 l/Rm), sie sinkt dann wegen der geringeren verbliebenen Restfeuchte bis September auf Null ab. Die anschließende Wiederaufnahme von Wasser aus der Atmosphäre und eventuell durch Schlagregen beträgt zwischen Oktober und Dezember durchschnittlich ca. 5 l/Rm monatlich.

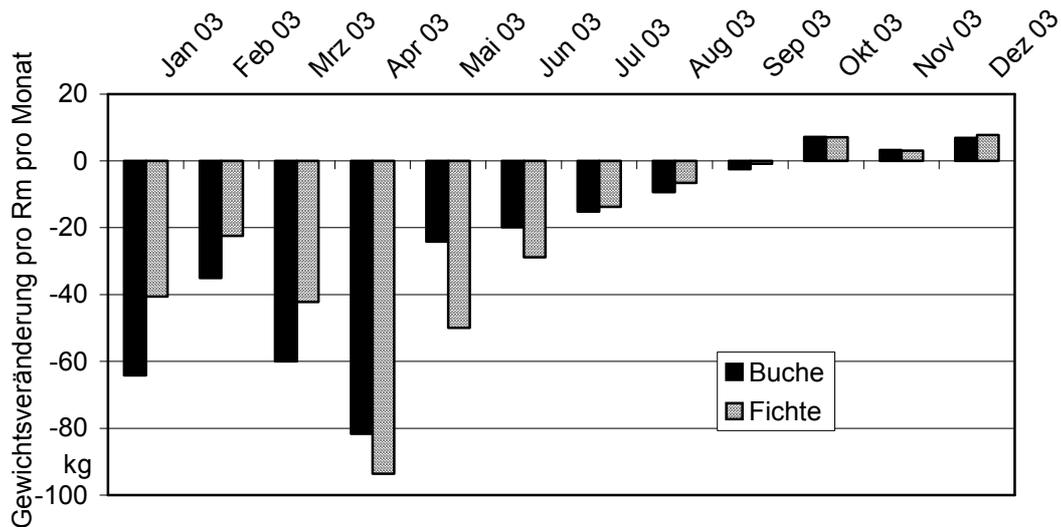


Abb. 78: Trocknungsrate in Litern bzw. kg Wasser pro Monat bei frisch eingelagerter Buche und Fichte im 1. Versuchsjahr (2003). Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising

Um diese Aussage auch hinsichtlich möglicher saisonaler Besonderheiten (trockene/feuchte Jahre) beurteilen zu können, werden die Trocknungsraten in Abb. 79 auch für den zweiten Lagerungsversuch (ein Jahr zeitversetzt) dargestellt. Darin zeigt sich, dass die beobachteten Unterschiede für die Holzarten auch unter anderen Klimabedingungen wiederholbar sind. Auch hier ist der absolute Wasserverlust der Buche in den ersten drei Monate höher als bei der Fichte.

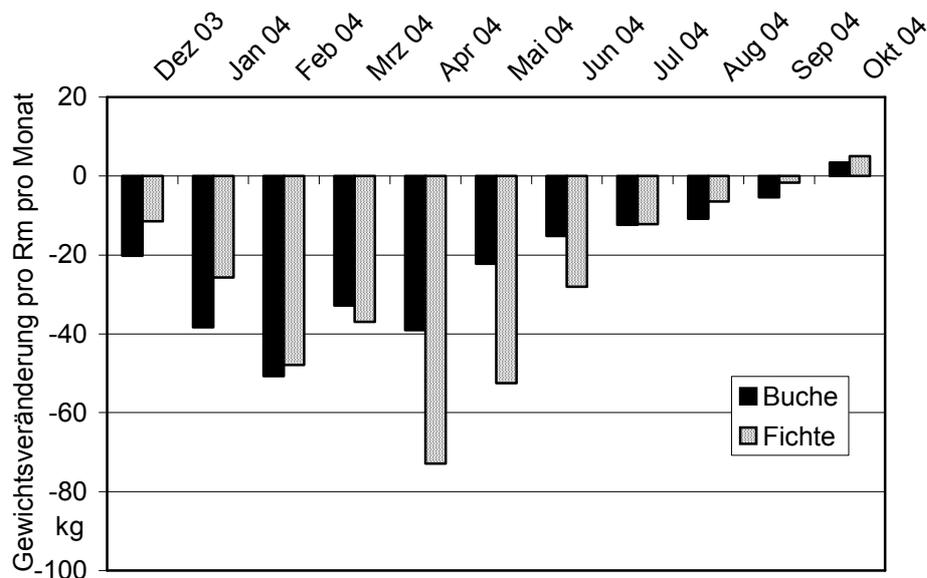


Abb. 79: Trocknungsrate in Litern bzw. kg pro Monat bei frisch eingelagerter Buche und Fichte im 2. Versuchsjahr (2004). Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising

Inwieweit die Unterschiede im Trocknungsverhalten der Holzarten auf strukturelle und dichtebedingte Unterschiede zurückzuführen sind, ist unklar. Bei diesen Eigenschaften unterscheiden sich die Holzarten stark (z. B. Rohdichte Fichte 0,43 g/cm³, Rohdichte Buche 0,68 g/cm³ [41]). Generell ist jedoch festzustellen, dass Fichtenbrennholz – entgegen der allgemeinen Auffassung – nicht schneller trocknet als Buchenholz, sondern dass Buche phasenweise sogar einen Trocknungsvorsprung besitzt. Wenn – wie allgemein üblich – eine vollständige Sommerperiode für die Trockenlagerung aufgewendet wird und für die Lagerung günstige Trocknungsbedingungen eingerichtet werden, bleiben diese Unterschiede für den Verbraucher ohne Auswirkung, zumal die von den Feuerungsanlagenherstellern geforderte Marke von maximal 20% Wassergehalt bei beiden Holzarten bis zum Herbst deutlich unterschritten wird.

Die hohen absoluten Wassermengen von bis über 80 l Wasser, die unter günstigen Klimabedingungen in einem Monat je Raummeter aus Buchenscheitholz verdunsten können sind allerdings nur möglich, wenn der Brennstoff noch relativ frisch ist und das enthaltene Restwasser noch nicht allzu fest gebunden ist. Diese beiden limitierenden Faktoren für die Trocknung entwickeln sich in der hier vorliegenden Lagerperiode im Verlauf weitgehend gegenläufig. Auf welche unterschiedliche Weise das Wasser im Holz gebunden sein kann zeigt Tab. 26. Dabei nehmen die Bindungskräfte, mit denen es in der organischen Masse "festgehalten" wird, von der Kapillarsorption über die Elektrosorption bis hin zur Chemosorption zu. Diese Bindungskräfte müssen durch die Trocknung überwunden werden.

Tab. 26: *Art der Wasserbindung im Holz (Quelle:[10])*

Bindung	Wassergehalt (%)	Merkmale
Kapillarsorption und Adhäsion	> 25	feines, ungebundenes Wasser in den Zellhohlräumen, gebundenes Wasser in den Holzfasern
Fasersättigungsreich	19 – 25	Wasser in den Holzfasern gebunden
Kapillarsorption	13 – 25	kolloidal gebundenes Wasser, Feuchtigkeitsbewegung durch Diffusion und Kapillarkräfte
Elektrosorption	5,7 – 13	Wasser an der Micelle durch elektrische Kräfte gebunden
Chemosorption	0 – 5,7	molekulare Anziehungskräfte

5.4.2 Vergleich der Versuchsjahre 2003/2004 (Wettereinfluss)

Die Lagerversuche wurden am Standort Freising in zwei aufeinanderfolgenden Jahren wiederholt, um anhand zweier möglichst unterschiedlicher Wetterverläufe verallgemeinerungsfähige Aussagen treffen zu können. Die klimatischen Bedingungen und deren Auswirkungen werden nachfolgend beschrieben.

Wetterunterschiede in den beiden Versuchsjahren. In der Tat waren die Wetterverläufe der beiden Versuchsjahre sehr unterschiedlich. Verglichen mit dem rekordtrockenen Sommer 2003 kann das Sommerhalbjahr 2004 eher als kühl-feuchtes Jahr beschrieben werden. Das lässt sich auch anhand der entsprechenden lokalen Wetteraufzeichnungen des Deutschen Wetterdienstes aufzeigen, wobei die Wetterstation sich in unmittelbarer Nachbarschaft zum Versuchsstandort in

Freising befand (ca. 500 m Luftlinie). Die entsprechenden Mittelwerte für Temperatur, Niederschlag und das Sättigungsdefizit der Luft sind speziell für die beiden Lagerperioden in Tab. 27 zusammengestellt.

Tab. 27: Klimadaten für die verschiedenen Lagerperioden der beiden Lagerversuche in Freising (Mittelwerte aus benachbarter Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes)

	Lagerperiode 1 Dez. '02 bis Nov. '03	Lagerperiode 2 Dez. '03 bis Nov. '04	langjähriges Mittel [6]
Mittlere Temperatur (°C)	8,8	8,2	7 – 8
Niederschlag (mm)	577	757	750 – 800
Sättigungsdefizit der Luft (hPa)	3,30	2,50	k.A.

Bei der Charakterisierung der Trocknungsbedingungen ist das Sättigungsdefizit die entscheidende klimatische Messgröße. Sie wird auch als "Dampfhunger" oder als Dampfdruckdifferenz bezeichnet und kann aus den beiden Messgrößen, der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur, errechnet werden. Je größer das Sättigungsdefizit ist, desto größer ist das absolute Wasseraufnahmevermögen der Luft. Das Sättigungsdefizit war in 2003 deutlich höher als in 2004 (Tab. 27), das gilt vor allem in den Monaten Juni bis August (Abb. 80), wodurch deutlich bessere Trocknungsbedingungen für das lagernde Brennholz vorlagen.

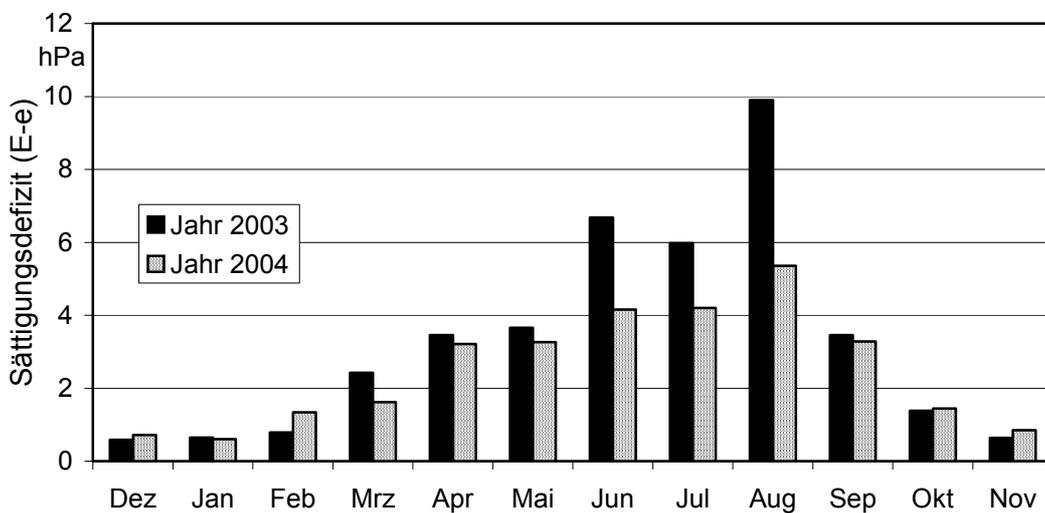


Abb. 80: Vergleich der mittleren monatlichen Sättigungsdefizite der Luft (E-e) in Freising in den beiden Lagerungsperioden 2003 und 2004

Auch Niederschläge können den Wassergehalt von abgedeckten im Freien lagernden Holzstapeln beeinflussen. Die deutlichen Niederschlagsunterschiede zwischen den beiden Versuchsjahren zeigt Abb. 81, sie sind besonders auffällig bei den trocknungsintensiven Monaten Juni, August und September.

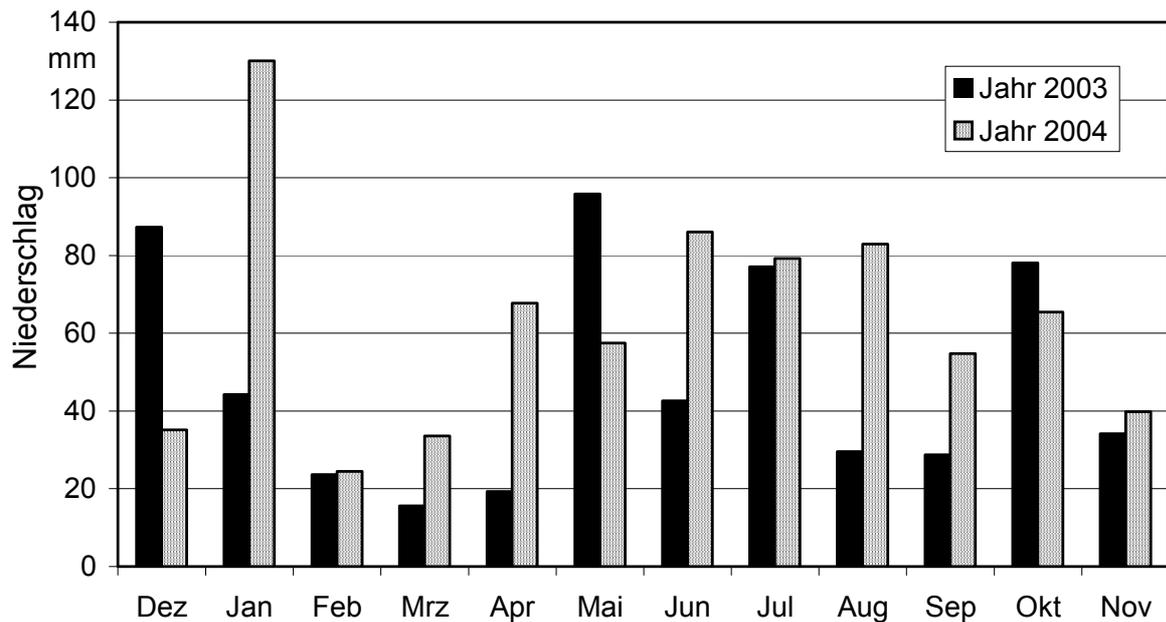


Abb. 81: *Vergleich der mittleren monatlichen Niederschläge in Freising in den beiden Lagerungsperioden 2003 und 2004*

Jahresbedingte Trocknungsunterschiede. Zum Vergleich der beiden Versuchsjahre werden in Abb. 82 und Abb. 83 die Trocknungsverläufe beider Versuche gemeinsam dargestellt, wobei zur besseren Übersicht auf den Verlauf für Kiefernholz verzichtet wird, zumal hier große Ähnlichkeiten zum Fichtenholz bestehen (vgl. dazu Abb. 77). Anders als in der ersten Lagerungsperiode ist der Ausgangswassergehalt der beiden Holzarten in der zweiten Lagerungsperiode mit 45% (Buche) und 60% (Fichte) deutlich unterschiedlich. Durch eine beschleunigte Trocknung im März kann die Fichte diesen Rückstand jedoch bis Juni mehr als kompensieren (Abb. 82), so dass die Marke von 20% danach von beiden Holzarten unterschritten ist. Das zeigen auch die ab April stark gestiegenen Trocknungsraten in Abb. 79, die unter anderem durch die unterschiedlichen Restwassergehalte (unterschiedliche Bindungskräfte!) der Holzarten zu begründen sind. Das in 2004 erreichte Trocknungsniveau liegt jedoch – zumindest beim Buchenholz – leicht über dem im 2003 erreichten Niveau, was auf einen Jahreseinfluss hindeutet. Derartige Unterschiede sind vermutlich eher auf die unterschiedlichen Sättigungsdefizite zurückzuführen (Abb. 80), prinzipiell kommen zusätzlich aber auch Niederschläge (Schlagregen) in Frage, zumal in den Sommermonaten 2004 hier deutliche Differenzen gegenüber 2003 auftraten (Abb. 81).

Die Tatsache, dass die Endwassergehalte bis zum Spätsommer in beiden Jahren trotz deutlich unterschiedlicher Wetterverläufe sich kaum unterscheiden und in allen Fällen Wassergehalte von deutlich unter 20% erreicht wurden, lässt darauf schließen, dass für günstige Lagerungsbedingungen eine Mindestlagerdauer von einem Jahr oder sogar nur einem Sommer ausreicht, um die geforderte Endfeuchte von "ofenfertigem" Holz zu erreichen. Das bedeutet aber auch, dass eine nach Holzarten differenzierte Festlegung der Mindestlagerdauer nicht erforderlich ist. Derartige Empfehlungen werden jedoch in der 1. Bundesimmissionsschutzverordnung (kommentierte Fassung)

gegeben (1. BImSchV, §3 (3)), darin wird als Faustregel vom Erreichen des lufttrockenen Zustands nach 1 Jahr (Pappel, Fichte), 1,5 Jahren (Linde, Erle, Birke), 2 Jahren (Buche, Esche, Obstbäume) bzw. 2,5 Jahren (Eiche) ausgegangen.

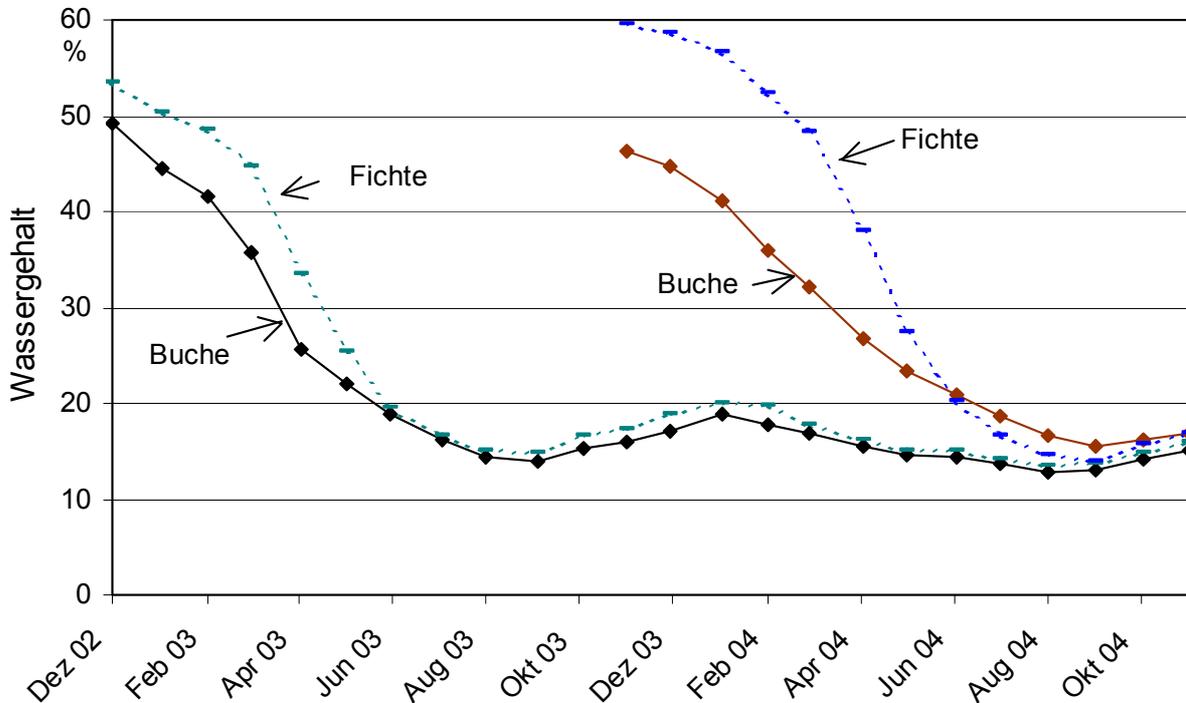


Abb. 82: Gegenüberstellung der Wassergehaltsverläufe bei der Lagerung von Buche und Fichte in beiden Lagerperioden (Versuch 1 ab Dez. 2002, Versuch 2 ab Dez. 03), Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising)

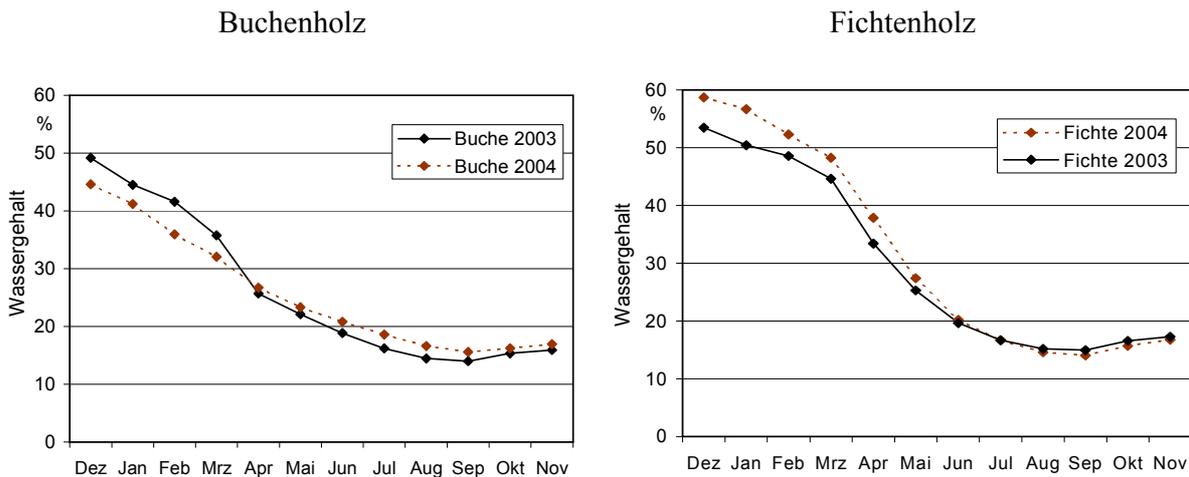


Abb. 83: Direkter Vergleich der Jahreseinflüsse auf die Wassergehaltsverläufe beider Lagerungsversuche (Versuch 1 ab Dez. 2002, Versuch 2 ab Dez. 03), Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten, Standort: Freising

Die unterschiedlichen Startwerte für den Wassergehalt zwischen den Versuchsjahren spiegeln die üblichen zeitlichen, altersbedingten und standörtlichen Wassergehaltsschwankungen im frisch geschlagenen Holz wider. Allein zwischen den einzelnen Scheiten einer Holzcharge lagen im vorliegenden Versuch gemessene Wassergehaltsunterschiede von bis zu 20%. Das zeigen die Auswertungen in Kapitel 5.6.

5.4.3 Einfluss des Lagerstandorts (Klima)

Zusätzlich zum vorangehend genannten Lagerungsstandort Freising (TUM Versuchsgut Dürnast) wurden in 2004 parallel weitere Lagerversuche im Allgäu (Kempten) durchgeführt, um anhand zweier möglichst unterschiedlicher Klimata verallgemeinerungsfähige Aussagen treffen zu können. Die für die Beurteilung der klimatischen Lagerungsbedingungen notwendigen Daten sind in Tab. 28 zusammengestellt.

Tab. 28: *Klimadaten der beiden Lagerungsstandorte Freising und Kempten (Mittelwerte aus den monatlichen Daten des Deutschen Wetterdienstes)*

	Freising	Kempten
Lagebeschreibung	Tertiäres Hügelland, nördlich von München	Voralpengebiet, Standort: Biomassehof Allgäu
Höhe über NN (m)	450	650
Mittlere Temperatur (°C)		
Dez. 02 bis Nov. 03:	8,8	8,4
Dez. 03 bis Nov. 04:	8,2	7,7
Niederschlagssumme (mm)		
Dez. 02 bis Nov. 03:	577	1024
Dez. 03 bis Nov. 04:	757	1118
Sättigungsdefizit der Luft (hPa)		
Dez. 02 bis Nov. 03:	3,30	2,95
Dez. 03 bis Nov. 04:	2,50	2,35

Die wesentlichen Unterschiede liegen vor allem im Niederschlag, der in Kempten um ca. 350 bis 500 mm über dem Freisinger Wert liegt, und in den niedrigeren Temperaturen in Kempten. In der Folge ist auch das Sättigungsdefizit der Luft, d. h. das Wasseraufnahmevermögen (vgl. Kapitel 5.4.2), verschieden, wobei im Jahresablauf vor allem der Augustwert hervorsteicht (Abb. 84).

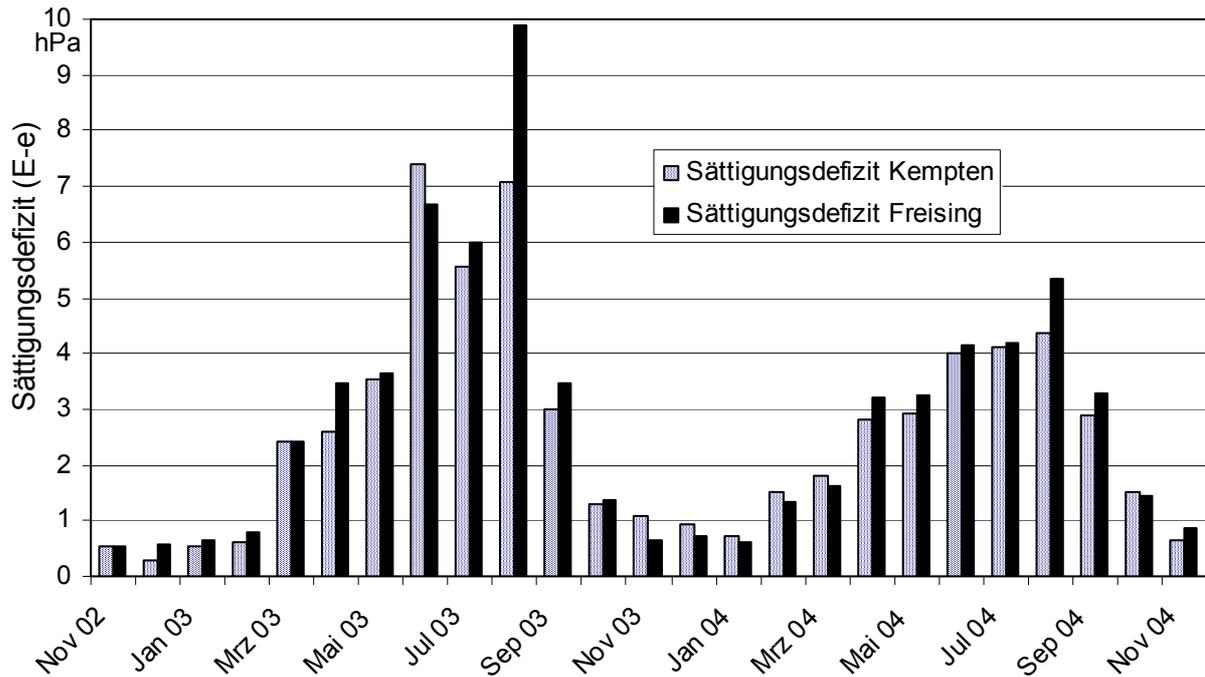


Abb. 84: *Vergleich und Verlauf des Sättigungsdefizits (Trocknungsvermögen) der Luft an den Standorten Kempten und Freising in den beiden Versuchsjahren*

Direkter Vergleich des Trocknungsverlaufs Freising/Kempten. An beiden Standorten war im Jahr 2003 ein Abtrocknen des Holzes um bis zu 10%-Punkte im Monat zu beobachten (Wassergehalt). In 2004 war dies nicht mehr möglich (Abb. 85). Unterschiede zwischen den Standorten sind vor allem im Sommer zu erkennen, dann trocknen die Buchen-Scheitholzbündel in Kempten langsamer. Dafür nimmt das Holz aber im Verlauf der Wintermonate weniger Feuchtigkeit auf, so dass im Januar ein Gleichstand an beiden Standorte erreicht ist.

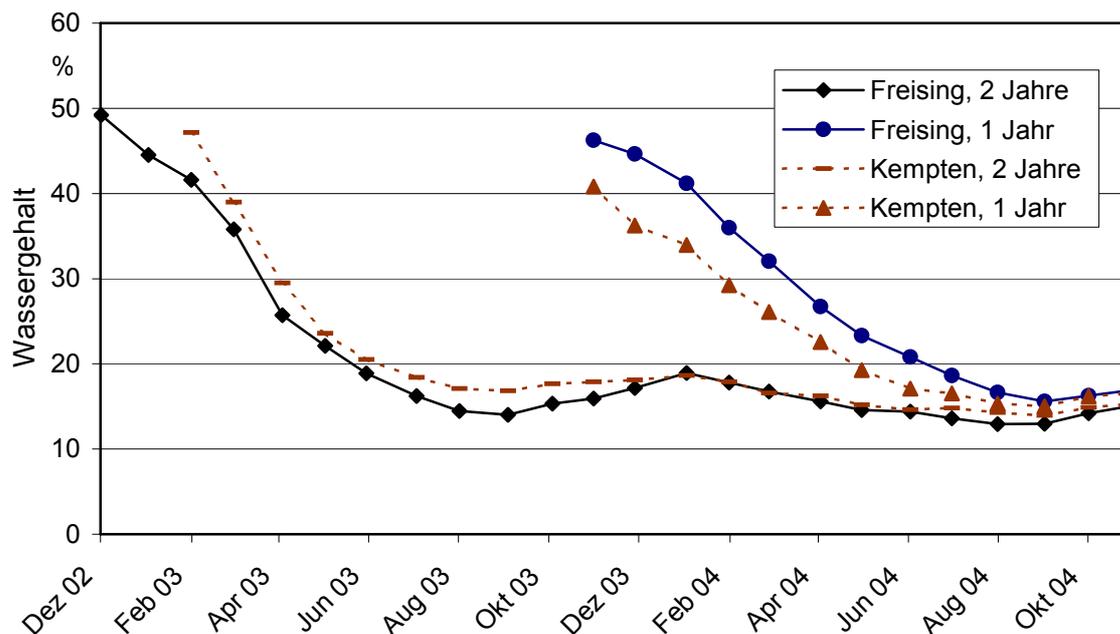


Abb. 85: Vergleich des Trocknungsverlaufes von Buchenscheitholz an den Standorten Freising und Kempten. Lagerart: außen, abgedeckt, gespalten

Von praktischer Bedeutung ist allerdings mehr die Beobachtung, dass an beiden Standorten bis zum Sommer – selbst mit der Hartholzart Buche – "ofenfertige" Trocknungszustände von unter 20% Wassergehalt leicht erreichbar sind. Das gilt auch für das (hier nicht dargestellte) Fichtenholz. Die Standortunterschiede wirken sich kaum aus. Das Holz am Standort Kempten war im Jahr 2004 zum Zeitpunkt der Einlagerung schon gut einen Monat früher gefällt worden und hatte dadurch einen Vorsprung, es beginnt die Trocknung deshalb mit gut 40% Wassergehalt und nicht wie in Freising mit 45%. Die Frage, wann das Holz die 20% Marke beim Wassergehalt unterschreitet, hängt folglich eher vom Ausgangswassergehalt als vom Lagerklima ab.

5.4.4 Einfluss der Aufbereitungs- und Lagerarten

Neben der in den voranstehenden Kapiteln angesprochenen Standardlagervariante des abgedeckten gespaltenen Meterholzes wurden an beiden Lagerstandorten in Freising und Kempten als weitere Varianten die geschütteten Kurzscheite in Gitterboxen sowie die Lagerung von ungespaltenen Rundlingen und die unabgedeckte bzw. die Unter-Dach-Lagerung untersucht. Die Auswertungen dieser Versuchsvarianten wird nachfolgend vorgestellt.

Geschüttete Kurzscheite in der Gitterbox. Bei dieser Aufbereitungs- und Lagerform trocknen die Holzscheite am schnellsten. Die 33 cm langen Scheite waren lose in die Gitterbox mit ca. 100 cm Schütthöhe eingefüllt und im Freien gelagert worden. In der abgedeckten Gitterbox erreichte das Holz schon im Mai die Marke von 20% Wassergehalt (Abb. 86), wobei zwischen den Baumarten Buche und Fichte kein deutlicher Unterschied im Trocknungsverhalten erkennbar ist. Die nicht abgedeckten Scheitholzpartien trockneten bis Januar praktisch nicht und kamen erst im Juli unter 20% Wassergehalt. Ohne Abdeckung kam es im weiteren Verlauf schon im Oktober wieder zum Überschreiten der 20%-Marke beim Wassergehalt.

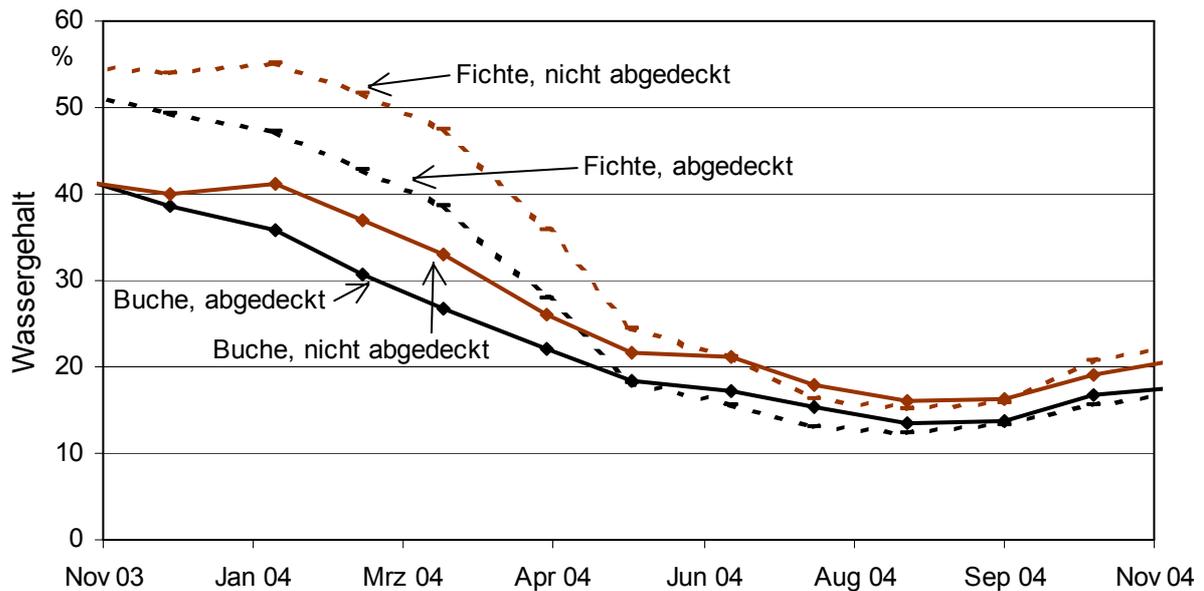


Abb. 86: *Wassergehaltsverlauf von gespaltenen 33 cm Scheiten (Buche/Fichte) bei abgedeckter und unabgedeckter Lagerung in Gitterboxen (geschüttet) in Freising im Jahr 2004*

Die Ergebnisse in Abb. 86 verdeutlichen, wie wichtig eine ganzjährige Abdeckung bei lose geschüttetem Scheitholz ist. Sie sollte spätestens im September erfolgen, andernfalls besteht die Gefahr, dass das Brennholz wieder zu viel Feuchtigkeit aufnimmt. Des weiteren wird deutlich, dass die 33-cm-Scheite, lose abgedeckt gelagert in einer Gitterbox, am schnellsten trocknen, denn zumindest die Buchenscheite erreichen schon im Mai des Jahres 2004 die 20% Marke. Sie nehmen aber auch rascher wieder Feuchtigkeit auf, so dass im Endeffekt, d. h. zum Zeitpunkt des Verbrennens im Winter, kein Unterschied zu den übrigen Sortimenten erkennbar ist. Dies lässt sich durch die Tatsache erklären, dass die Feuchtigkeit vorrangig über die Stirnseiten der Scheite entweicht, und kurze Scheite ein besseres Verhältnis von Stirnseite zur Gesamtmasse des Scheites aufweisen. Abb. 87 verdeutlicht, dass die bevorzugte Feuchtigkeitsbewegung im Holz der Längsrichtung der Holzzellen folgt, da hier weniger Barrieren überwunden werden müssen. Bei geringem Trocknungsvermögen der Luft und hoher Luftfeuchtigkeit im Herbst erweist sich diese Eigenschaft wieder als Nachteil, denn sie erleichtert auch die Wiederaufnahme von Feuchtigkeit.

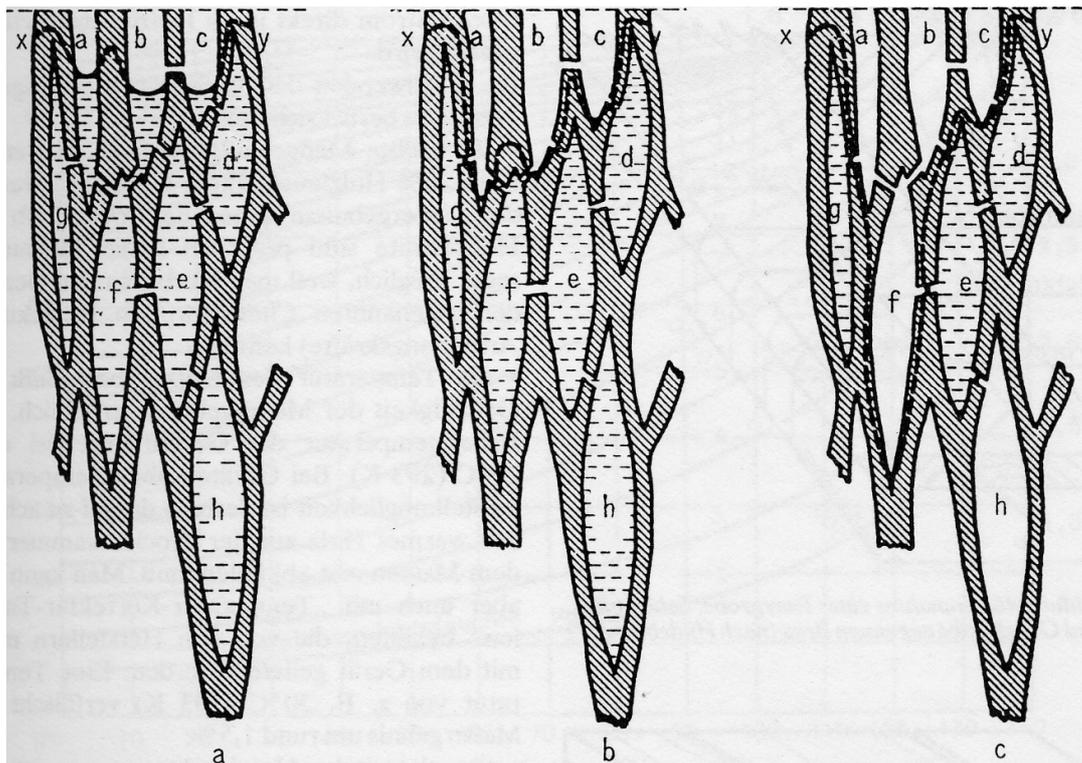


Abb. 87: Schematische Darstellung der kapillaren Feuchtigkeitsbewegung in einem mikroskopischen Schnitt eines Koniferenholzes bei der Trocknung [41]; a: Anfangszustand eines frisch gefällten Holzes; b, c: Fortschritt der Trocknung im weiteren zeitlichen Verlauf

Vergleich gespalten/ungespalten. Aus einer einheitlichen Holzcharge wurde ein Teil des Holzes auch ungespalten eingelagert, wobei es ansonsten wie das gespaltene Holz in Bündeln zusammengesichert war. Die Trocknungsverläufe sind in Abb. 88 dargestellt. Darin sind die unterschiedlichen Wassergehalte zu Versuchsbeginn auf die hier gewählte Berechnungsweise zurückzuführen, bei der von den Endwassergehalten ausgehend über die Gewichtsveränderungen und den Verlustabzug auf den Ausgangswassergehalt geschlossen wurde (Kapitel 4.4). Zu Beginn der Lagerung im Dezember 2002 hat das gespaltene Holz in den Bündeln 45% Wassergehalt und das ungespaltene Holz in den Bündeln ca. 47% Wassergehalt (Abb. 88). Von Anfang an trocknet das gespaltene Holz schneller als das ungespaltene Holz. Das unterschiedliche Trocknungsverhalten zeigt sich besonders deutlich bei der Erwärmung im Frühjahr (ca. April 2003). Zudem erreicht das gespaltene Holz im ersten Jahr mit 14% einen niedrigeren Wassergehalt als die ungespaltenen Rundlinge mit 18%, allerdings ist deren Wiederbefeuchtung in den Monaten Oktober bis Januar auch geringer. Nach spätestens ca. zwei Jahren sind die Unterschiede zwischen den Aufbereitungsarten ausgeglichen.

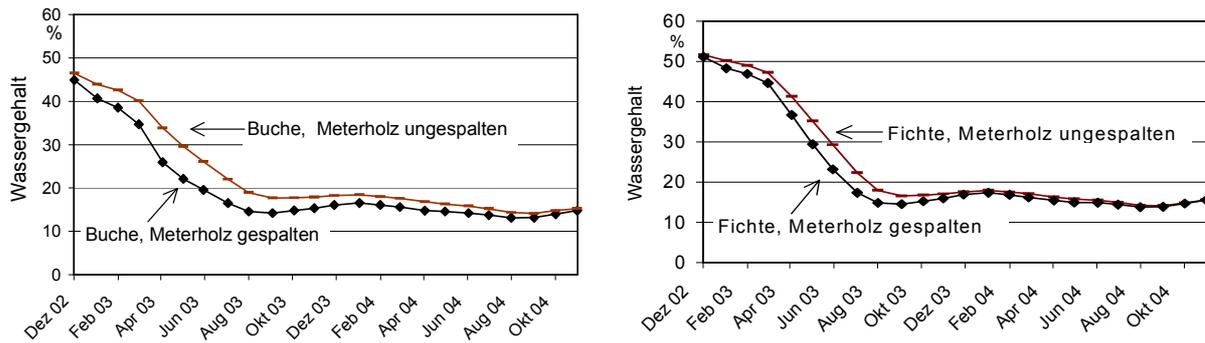


Abb. 88: *Vergleich der gespaltenen Meterscheite mit ungespaltenen bei Buchen und Fichte in Freising (innen gelagert)*

Die unterschiedlichen Trocknungsverläufe lassen sich durch die unterschiedliche Größe der gesamten transpirierenden Holzoberflächen erklären. Bei der Versuchsdurchführung war darauf geachtet worden, dass die Stirnflächen pro Raummeter bei beiden Sortimenten ungefähr gleich groß waren. Die unterschiedlichen Trocknungsgeschwindigkeiten sind somit auch darauf zurückzuführen, dass auch über die Längsflächen Feuchtigkeit abgegeben wird. Bei Rundlingen bleibt das Holz dagegen durch die weitgehend unverletzte Rinde zusätzlich vor Austrocknung geschützt.

Aus den vorgestellten Ergebnissen ergibt sich die generelle Forderung nach einer längeren Lagerdauer für ungespaltene Meterscheite, allerdings kann unter geeigneten Bedingungen auch hier eine Lagerdauer von einem Jahr ausreichen. Die 2-jährige Lagerung führte im Versuch nicht zu einer sonst häufig beobachteten Verstockung des Holzes, das lässt auf optimale Lagerbedingungen (gute Luftzirkulation, Schutz vor Feuchtigkeit etc.) schließen.

Vergleich Lagerarten (innen/außen und abgedeckt/unabgedeckt). Im Winter von Dezember bis März ist bei unabgedeckter Außenlagerung nicht mit einer nennenswerten Trocknung zu rechnen; nur bei Innenlagerung oder abgedeckter Lagerung im Freien findet eine Abtrocknung statt (Abb. 89), sofern, wie im vorliegenden Fall, ein gut durchlüfteter Standort gegeben ist. Die unabgedeckte Lagerung führt auch zu einer deutlich höheren Wiederaufnahme von Feuchtigkeit in der zweiten Winterperiode, dann ist mit 28% zwischenzeitlich sogar ein mittlerer Wassergehalt gegeben, bei dem keine Eignung für eine direkte Brennstoffnutzung in Scheitholzfeuerungsanlagen mehr gegeben ist. Im Sommerhalbjahr kehrt sich dagegen die Situation teilweise um: von April bis September sind die außen gelagerten Scheitbündel trockener als die innen gelagerten.

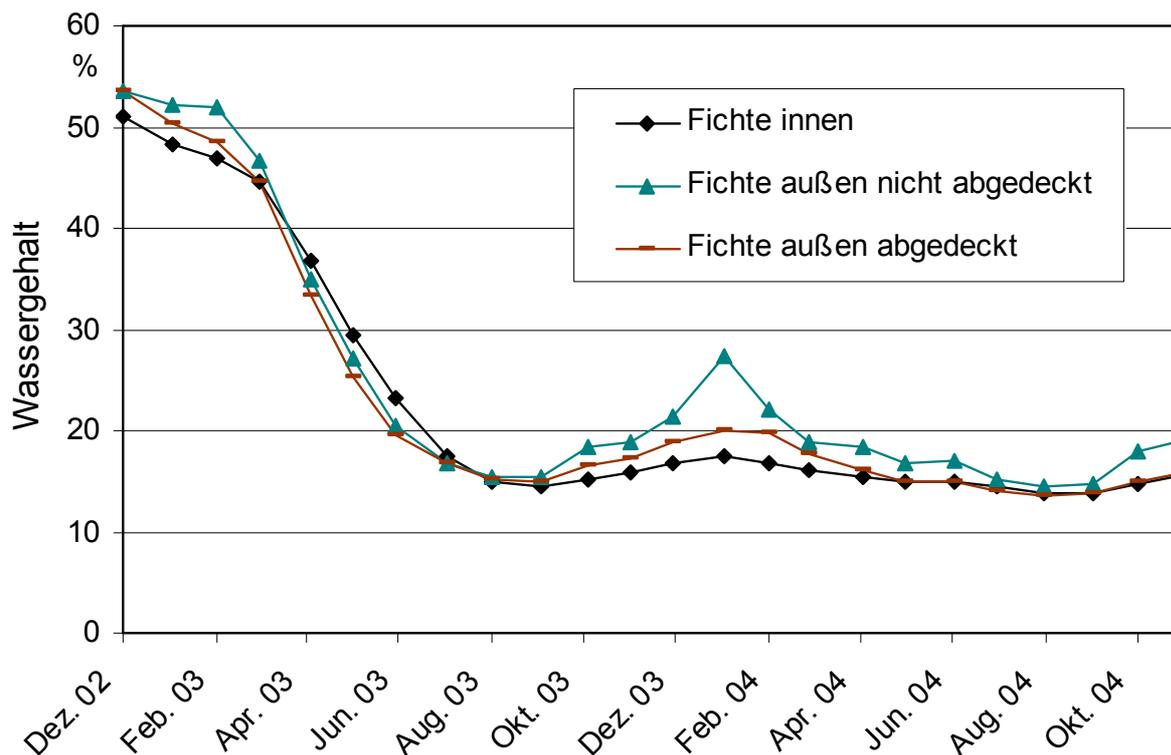


Abb. 89: Vergleich der Lagerarten bei der Fichte am Standort Freising

Im feuchteren Klimabereich am Standort Kempten (vgl. Kapitel 5.4.3) sind die Unterschiede zum Teil noch stärker ausgeprägt, wenngleich der Beobachtungszeitraum dort um zwei Monate zeitversetzt beginnt (Abb. 90). Auch hier führt eine fehlende Abdeckung bei Lagerung im Freien zu einer deutlichen Wiederaufnahme von Feuchtigkeit im Herbst und Winter, wodurch eine direkte Brennstoffnutzung in Scheitholzfeuerungsanlagen unmöglich wird. Auch im Sommer ist der Grad der Abtrocknung bei fehlender Abdeckung geringer als am Standort Freising. Generell kann festgestellt werden, dass ohne Abdeckung ein sicheres Erreichen eines ofenfertigen Trocknungsgrades nicht schon nach einem Jahr möglich ist.

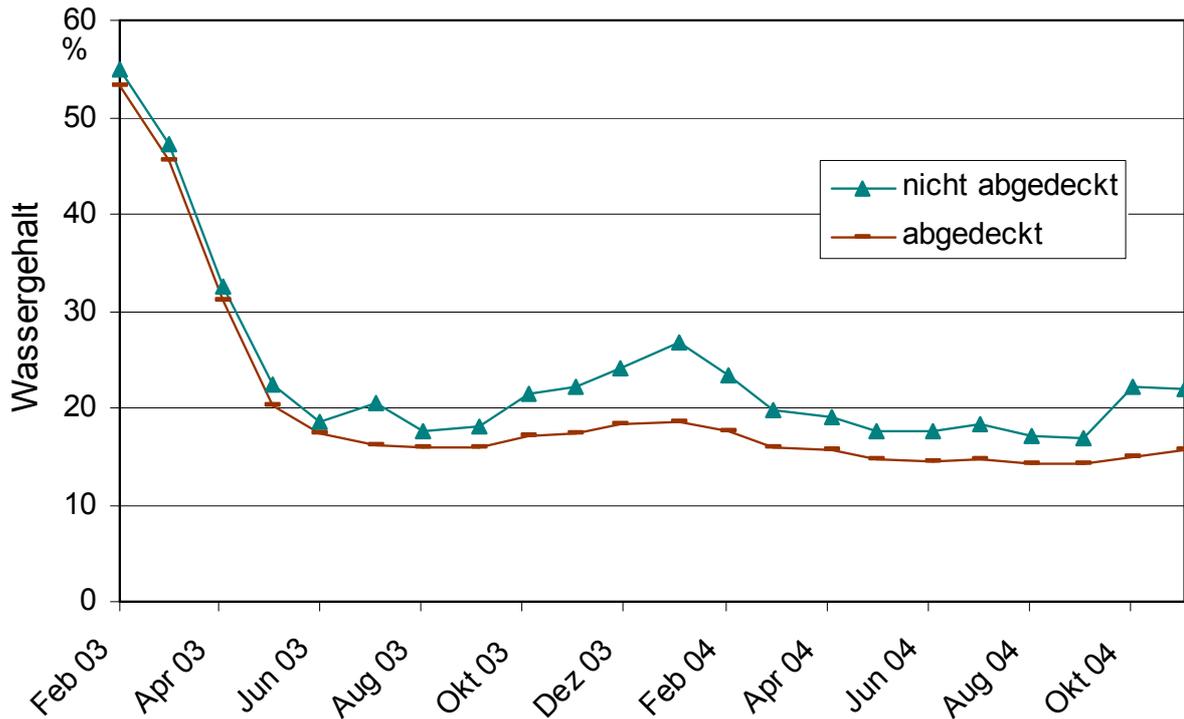


Abb. 90: Vergleich der Lagerarten bei der Fichte am Standort Kempten

5.5 Wassergehaltsverlauf in einem Holzsplit im Jahresverlauf

In Abb. 91 ist die Wassergehaltsverteilung in sieben verschiedenen Fichten- und Buchen-Meterscheiten dargestellt, wobei auch die Veränderung im Zeitablauf des Beobachtungsjahres 2004 erkennbar ist. Das Holz war im November 2003 geschlagen und sofort in Meterscheite gespalten worden (zur Methodik vgl. Kapitel 4.5.3). Schon im Dezember sind erste Trocknungsvorgänge erkennbar. Diese finden zunächst und vor allem an den Stirnseiten statt. Im Februar liegt der Wassergehalt – beispielsweise bei den Buchenscheiten – in der Mitte eines Meterscheites annähernd noch beim Anfangswassergehalt von 45%, wohingegen die Seiten schon auf 35% Wassergehalt abgetrocknet sind. Auch im März zeigt sich ein hoher Wassergehaltsgradient von der Mitte hin zu den Stirnseiten. Zum Ende der Trocknung im September bildet der Wassergehaltsverlauf annähernd eine Gerade. Da sich die Holzfeuchte nun in einem Gleichgewichtszustand mit der Atmosphäre befindet, finden keine Ausgleichsbewegungen mehr statt. Mit dem Einsetzen der feuchteren Herbstwitterung im Oktober wird erkennbar, dass die Wiederbefeuchtung von den Stirnseiten her einsetzt (Abb. 91). Vor allem kurze Scheite müssen daher vor dem Herbst abgedeckt oder in einen überdachten Raum umgelagert werden, wenn sie schon in der folgenden Heizsaison verwendet werden sollen.

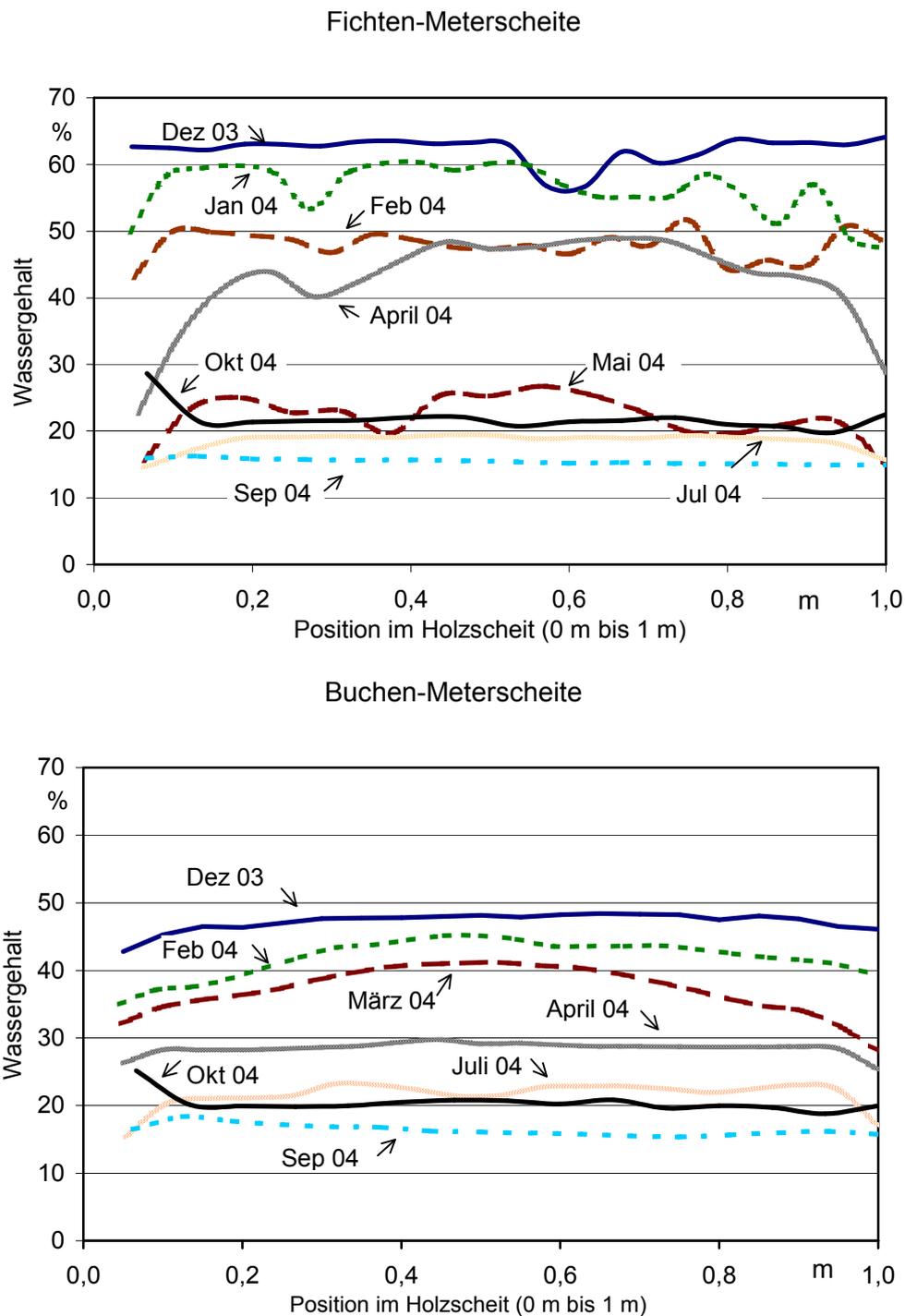


Abb. 91: *Wassergehaltsverteilungen im Meterscheitholz im Jahresverlauf bei ungedeckter Lagerung im Freien*

Die in Abb. 91 dargestellte inhomogene Wassergehaltsverteilung in einem trocknenden Scheit ist zum größten Teil auf die Tatsache zurückzuführen, dass die bevorzugte Feuchtigkeitsbewegung im Holz der Längsrichtung der Holzzellen folgt (vgl. hierzu Abb. 87), wodurch ein großer Teil des Wasserverlustes über die Stirnseiten stattfindet. Allerdings kann auch die Inhomogenität des Holzes selbst (z.B. Dichteunterschiede) für eine uneinheitliche Feuchteverteilung verantwortlich

sein. Abb. 92 zeigt, wie beispielsweise Asteinschlüsse bei 20, 60 und 90 cm durch ihren niedrigeren Wassergehalt auffallen.

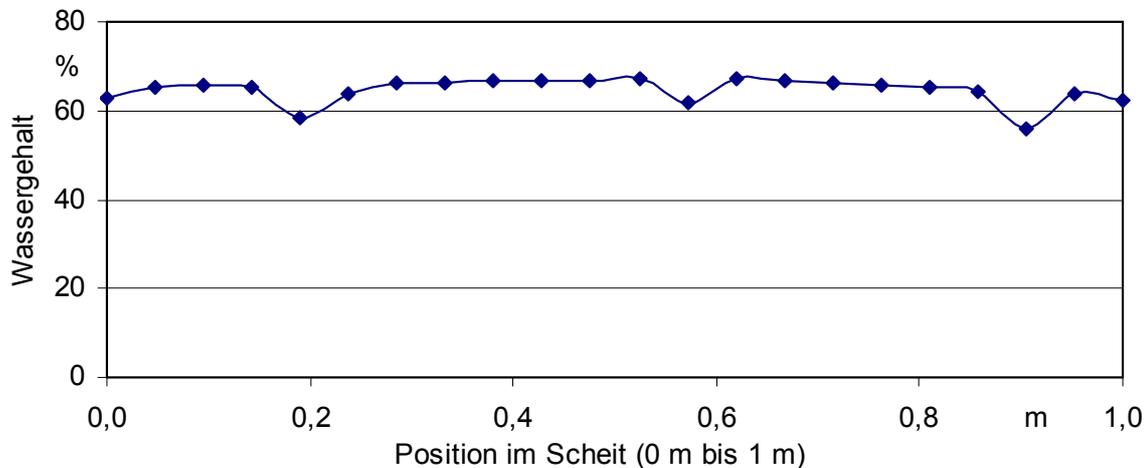


Abb. 92: *Wassergehaltsverteilung in einem waldfrischen Kiefernrundling mit Asteinschlüssen bei 20, 60 und 90 cm*

Neben der hier in Längsrichtung gemessenen Wassergehaltsverteilung ist auch im Querverlauf des Holzes (radial) mit veränderlichen Wassergehalten zu rechnen. Das außen liegende Splintholz, beispielsweise, ist im frischen Zustand zunächst feuchter als das Kernholz [46]. Das Beispiel eines frei stehenden trocknenden Kantholzes in Abb. 93 zeigt, dass Holz von außen her trocknet, es also zum Zeitpunkt der Trocknung (im Gegensatz zur Wiederbefeuchtung z. B. im Winter) am Rand trockener ist als in der Mitte. Zu beachten ist dabei jedoch, dass hier anstelle des Wassergehaltes (w) die Holzfeuchte (u) angegeben ist. Ein Wassergehalt von 20% (bezogen auf die Gesamtmasse) entspricht einer Holzfeuchte von 25% (bezogen auf die Trockenmasse).

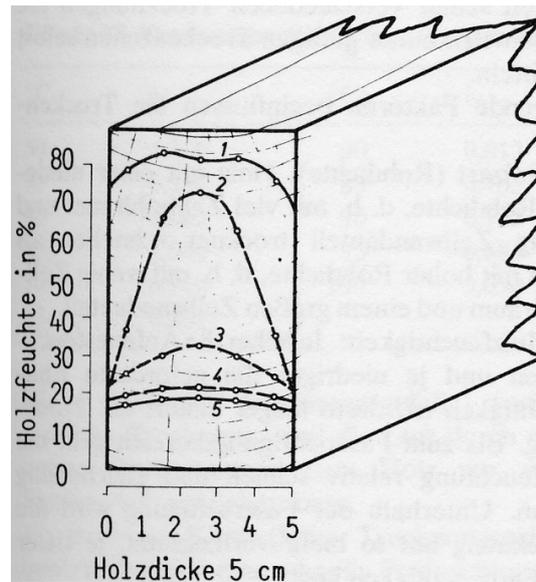


Abb. 93: *Veränderung der Holzfeuchteverteilung in einer 50 mm dicken frei stehenden Buchenbohle [28]. Erläuterung: 1 nach 6 Wochen, 2 nach 6 Monaten, 3 keine Angabe, 4 nach 12 Monaten, 5 nach 18 Monaten*

5.6 Der Trockenmasseverlust des Scheitholzes bei der Lagerung

Durch den Vergleich der Gesamttrockenmassen zu Lagerbeginn und zum Lagerende sind Aussagen über die Trockenmasseverluste über die gesamte Lagerdauer möglich. Dabei ist festzustellen, dass die Trockenmasseverluste der Meterstücke bei Innenlagerung über 24 Monate überwiegend geringer waren als bei Außenlagerung (Abb. 94). Bei den Aufbereitungsformen (gespalten/ungespalten) und den Holzarten (Buche/Fichte) lassen sich dagegen keine einheitlichen Trends erkennen. Das gilt auch für die außengelagerten Varianten "abgedeckt" und "nicht abgedeckt", die hier wegen der großen Streuung der Einzelwerte zusammengefasst werden mussten. Auch zum Verlauf des Trockenmasseverlustes lassen sich aus den durchgeführten Versuchen keine Aussagen ableiten, da der Trocknungsversuch (Kapitel 5.4) zwischen der Anfangs- und Endfeststellung des Wassergehaltes möglichst ungestört von weiteren Probennahmen ablaufen sollte.

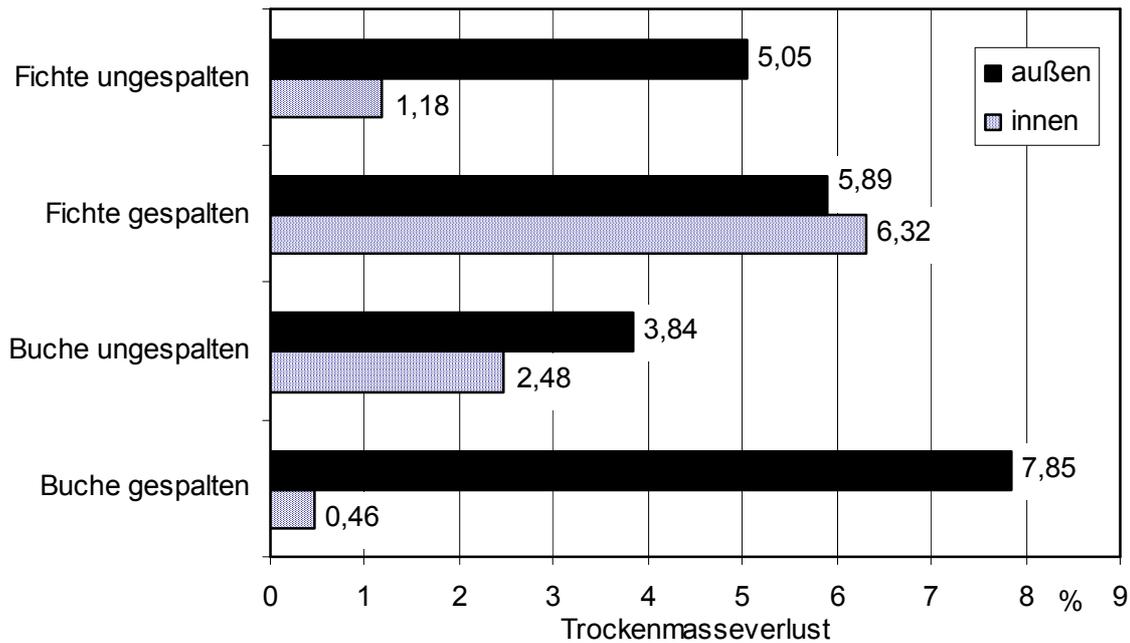


Abb. 94: *Trockenmasseverlust unterschiedlicher Meterholzsortimente bei Lagerung innen und außen. Lagerstandort: Freising, Lagerdauer: 24 Monate, Werte für "außen" sind Mittelwerte für abgedeckte und ungedeckte Lagerung*

Generell sind die absoluten Zahlenwerte für die Trockenmasseverluste mit einer relativ großen Unsicherheit behaftet. Das zeigt die große Streuung der Werte, vor allem für die außen gelagerten Bündel. Offenbar ist eine repräsentative Probennahme gerade bei langen Scheiten schwierig, so dass trotz des hohen Messaufwandes (Endwassergehaltbestimmung an je vier Scheiten pro Bündel à drei Messstellen, d. h. über 600 Proben) nur eine ungefähre Größenordnung für die Verluste feststellbar ist. Die hohe Messwertstreuung geht vor allem auf die messtechnische Unsicherheit bei der Bestimmung des Anfangswassergehaltes zurück, dieser ist im Gegensatz zum Endwassergehalt deutlich weniger einheitlich, das gilt sowohl für die Messwerte zwischen den Scheiten als auch für die Feuchteverteilung innerhalb der Scheite. Diese probenahmetechnische Schwierigkeit lässt sich am besten verdeutlichen, indem die Bandbreite der Wassergehalte im Frischzustand betrachtet werden, diese lag bei Fichtenholz zwischen 40,3 und 60,7% (bei 14 je dreifach beprobten Meterhölzern). Bei Buchenholz betrug die Bandbreite von 39,4 bis 49,2% (bei 15 je dreifach beprobten Meterhölzern). Auch die Standardabweichung der Wassergehalte zwischen den Scheiten lag mit 5,2 (Fichte) bzw. 2,7 (Buche) relativ hoch.

Da keine systematischen Unterschiede der einzelnen Sortimente erkennbar sind, erscheint es auch angesichts der o. g. Unsicherheiten geboten, die Trockenmasseverluste als Mittelwerte anzugeben. Für eine überschlägige Abschätzung der Trockenmasseverluste bei 2-jähriger Lagerung ist somit bei gut belüfteter Innenlagerung von einem Wert von ca. 2,6% auszugehen. Bei Außenlagerung erhöht sich der Trockenmasseverlust auf ca. 5,7%. Mit diesen Werten wurden auch die gemessenen Gewichte der einzelnen Holzbündel zur Bestimmung der einzelnen Wassergehalte und somit der Wassergehaltsverlauf über die Lagerungsdauer korrigiert (Kapitel 5.5).

Nicht in die Auswertungen einbezogen wurden die Werte für die Bündel der Versuchserweiterungen mit Fichte und Buche im November 2003. Bei dieser nur einjährig durchgeführter Lagerung

war die Repräsentativität der Probennahme für die Wassergehaltsbestimmung offenbar nicht gegeben, denn in der Auswertung hatten sich rechnerisch sogar leichte Trockenmassezuwächse ergeben. Da sich diese unplausiblen Werte vor allem durch die hier geringere Probenanzahl erklären lassen, wurden die Auswertungen zur Trockenmasseverlustbestimmung verworfen. Ähnlich unplausibel waren auch die Ergebnisse für das Kiefernholz, die ebenfalls verworfen wurden; hier hatten sich ebenfalls rechnerisch leichte Trockenmassezuwächse ergeben. Dennoch lässt sich auch aus diesen Fehlversuchen ableiten, dass die für Fichte und Buche genannten Verlustwerte eher als Obergrenze der tatsächlichen Verluste zu interpretieren sind, sofern – wie im vorliegenden Fall – eine gute Durchlüftung der Holzstapel innen wie außen stets sichergestellt ist.

Die Dauerhaftigkeit des Holzes stellt eine nach DIN EN 350-2 [16] messbare Kenngröße für Holz dar, sie ist definiert als die Zeitspanne, während der verarbeitetes oder unverarbeitetes Holz ohne die Anwendung von Konservierungsmaßnahmen seinen Gebrauchswert behält. Sie wird u. a. bestimmt durch Raumdichte, Harzgehalt und Inhaltsstoffe und kann, je nach dem einwirkenden Agens, differenziert werden in Dauerhaftigkeit gegenüber Chemikalien, Feuer, atmosphärischen Einflüssen, Pilzen, Bakterien, Termiten etc.. Die Dauerhaftigkeit gegenüber Pilzen wird durch Abbauversuche an genormten Holzproben ermittelt. Unter praxisnahen Bedingungen im Wald (Lagerung von Rund- oder Schnittholz) wird sie als "Lagerverhalten" [3] bezeichnet. Gemäß dem in Tab. 29 vorgestellten Klassifizierungsschema wäre bei Kiefernholz ein geringerer Trockenmasseverlust zu erwarten als bei Buchen- und Fichtenholz.

Tab. 29: *Natürliche Dauerhaftigkeit nach DIN EN 350-2 [58]und[16]*

Resistenzklasse		Mittlere Standdauer und Holzarten
1	sehr dauerhaft	13 Jahre Standdauer nur überseeische Holzarten (z. B. Teak)
1 bis 2	dauerhaft – sehr dauerhaft	11 bis 13 Jahre Standdauer z. B. Robinie
2	dauerhaft	8 bis 11 Jahre Standdauer z. B. Eiche, Mahagoni
3	mäßig dauerhaft	5 bis 8 Jahre Standdauer z. B. Douglasie, Nussbaum
3 bis 4	wenig bis mäßig dauerhaft	4 bis 6 Jahre Standdauer z. B. Lärche, Kiefer
4	wenig dauerhaft	2 bis 5 Jahre Standdauer z. B. Fichte, Tanne
5	nicht dauerhaft	<3 Jahre Standdauer z. B. Buche, Birke, Ahorn, Esche

5.7 Dichteunterschiede innerhalb der gelagerten Holzarten

Schon zu Lagerungsbeginn waren größere Gewichtsunterschiede zwischen den Standardbündeln der Standorte Freising und Kempten aufgefallen. Es wurde vermutet, dass die Rohdichte der Baumarten von der Norm, also dem Gesamtdurchschnitt, abweicht. Bei Lagerende konnte diese These durch das letzte Wiegen und das genaue Ermitteln des Wassergehaltes nachgeprüft werden.

Dabei zeigte sich, dass die Stapeldichte der in Freising eingelagerten gespaltenen Fichtenholzcharge ähnlicher Scheitdurchmesser (visuelle Überprüfung) mit durchschnittlich 323 kg/Rm deutlich über dem Wert für Kempten mit 257 kg/Rm oder dem Wert für die spätere Lagerversuchserweiterung in Freising mit 251 kg/Rm lag. Damit ergibt sich ein Unterschied der drei genannten Chargen von über 20%. Die einzelnen Raumdichten dieser auf einen Einheitswassergehalt von 15% berechneten Holzmasse sind in Abb. 95 zusammengestellt.

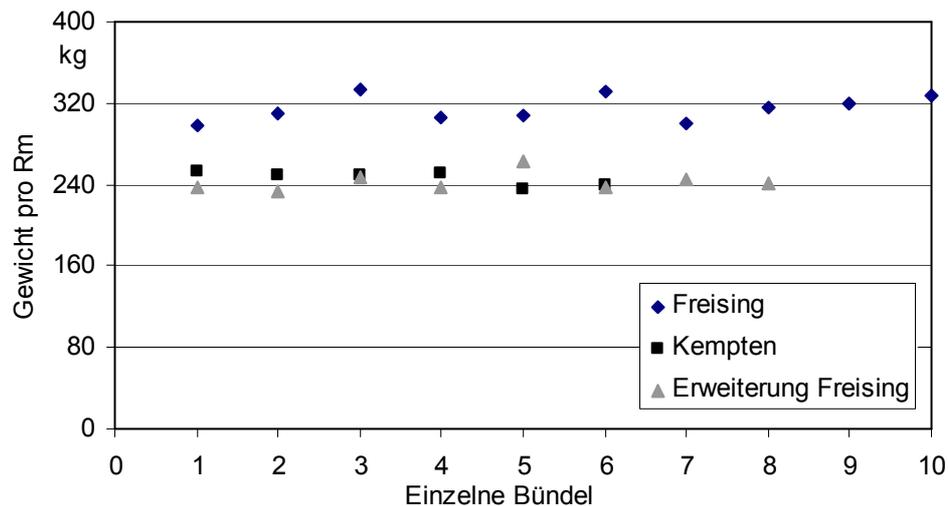


Abb. 95: Gewichtsstreuung pro 1 Rm Bündel mit gespaltenem Fichtenholz (berechnet auf einen einheitlichen Bezugswassergehalt von $w=15\%$)

Diese auf den ersten Blick relativ großen Unterschiede lassen sich durch die natürlichen Rohdichteschwankungen des Holzes erklären, wobei die Rohdichte die Dichte der reinen Holzmasse ist. Sie variiert zwischen zwei verschiedenen Ernteorten und je nach Dominanz des Baumes (ober- oder unterständiger Baum) auch innerhalb eines Baumes (Wipfelholz, Astholz oder Stammholz, Holz des Stammfußes, Anteil an Druckholz, etc.). Diese Variabilität ist in Abb. 96 für ausgewählte Baumarten dargestellt.

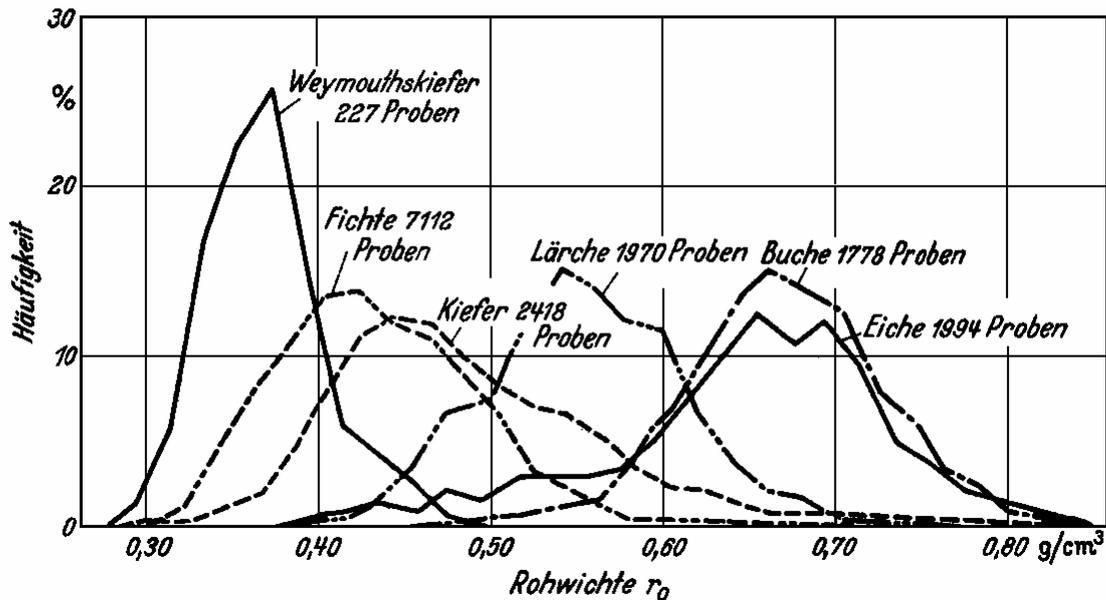


Abb. 96: Häufigkeitsverteilung der Rohdichte (veraltet "Rohwichte") bei ausgewählten Baumarten [33]

Die im Versuch gemessenen Gewichte der einheitlich großen Fichten-Halbraummeterbündel (0,5 Rm) wurde vereinfachend in eine Raummeterangabe (Gewichtsverdoppelung) und auf einen Referenzwassergehalt von $w=15\%$ umgerechnet. Diese so errechneten Raummetergewichte lagen im verkaufsfertigen Zustand zwischen 230 kg bis 330 kg. Bei Rohdichtespannen für Fichte aus Abb. 96 (0,30 g/cm³ bzw. 0,64 g/cm³) errechnet sich für lufttrockenes Fichtenholz eine maximale Spannweite von sogar 193 bis 412 kg/Rm (lufttrocken $w=15\%$). Aus Sicht des Produzenten ist aber ein volumenbezogener Scheitholzverkauf dennoch relativ risikolos, weil sich über die Masse des insgesamt abgesetzten Holzes ein für die Preisfeststellung zutreffendes mittleres Raumgewicht von ca. 260 kg/Rm ergibt (bei 15% Referenzwassergehalt). Ein möglicher Brennholzkunde kann hingegen theoretisch im Extremfall ein Fichtenraummeter-Bündel gleichen Wassergehalts mit 193 kg oder mit 412 kg für den gleichen Geldbetrag erwerben, was bezogen auf den Brennstoffwert einem über 100-%igen Unterschied gleichkommt. Derartige Spannweiten sind allerdings in der Praxis äußerst selten.

Dennoch könnte eine massebezogene Holzpreisfeststellung (Verkauf nach Gewicht) hier Abhilfe schaffen, sofern der Wassergehalt innerhalb akzeptabler Bandbreiten schwankt. Generell sind die möglichen Gewichtsunterschiede zwischen waldfrischen und luftgetrockneten Holzbündeln auch im Extremfall etwas niedriger als die maximale Spannweite bei den Dichteunterschieden: Ein Fichten-Raummeterbündel, das im luftgetrockneten Zustand ($w=15\%$) 264 kg wiegt, kann im waldfrischen Zustand ($w=50\%$) maximal 459 kg schwer sein.

Neben dem Wassergehalt und der Holzdicke hängt das Gewicht eines Raummeterbündels auch von der Aufbereitungsform ab. Mit ungespaltenen Meterholz-Rundlingen lässt sich in der Regel eine dichtere Packung erreichen, als mit gespaltenem Holz, das zeigt Abb. 97. Für den Brennholzhandel mit volumenbezogener Abrechnung ergibt sich daraus eine zusätzliche Unsicherheit bei der Wertfeststellung, zumal in Abb. 97 auch die deutlich erhöhten Gewichte bei der Fichte ersichtlich sind, was auf einen höheren Rohdichtewert als 0,43 g/cm³ für die Fichte hinweist. Die

Bestimmung von Umrechnungsfaktoren für die einzelnen Aufbereitungs- und Stapelformen stellt einen eigenen Arbeitsschwerpunkt im vorliegenden Projekt dar, hierüber wird in Kapitel 4.4 berichtet.

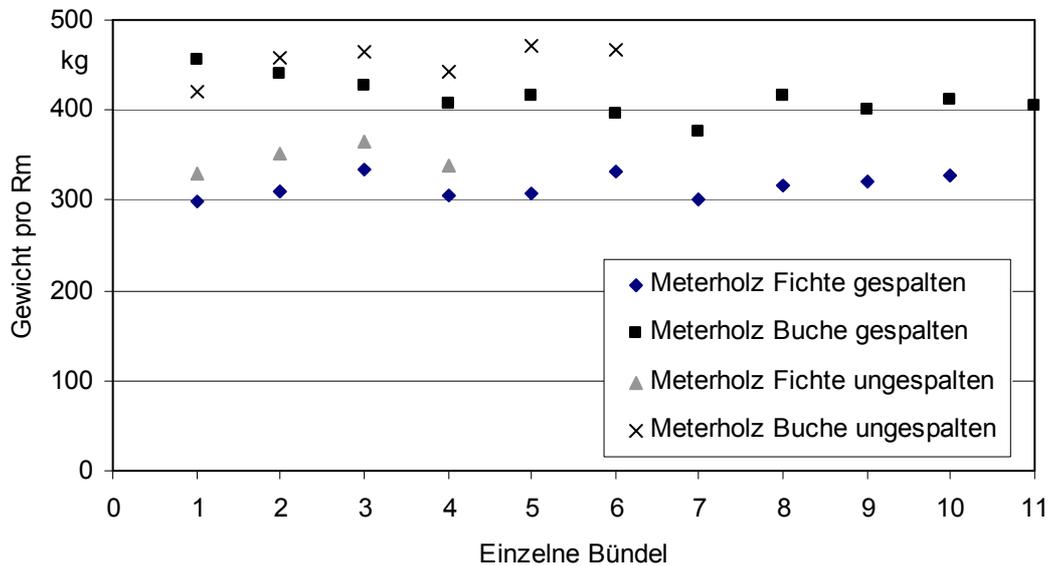


Abb. 97: Gewichte von Rundlingen und gespaltenem Holz in einem Raummeterbündel bei Fichte und Buche (berechnet auf einen einheitlichen Bezugswassergehalt von $w=15\%$)

5.8 Umrechnungsfaktoren für Brennholzsortimente

5.8.1 Ergebnisse der Stapelversuche

Die in Kapitel 4.4 dargestellten Messungen wurden hinsichtlich der Umrechnungsfaktoren zwischen den verschiedenen Buchen- und Fichtenholzsortimenten ausgewertet; die Ergebnisse werden in Abb. 98 und Abb. 99 dargestellt. Darin wurde eine Darstellungsweise gewählt, bei der ein Raummeter mit geschichteten 33-cm-Scheiten bzw. gespaltenen Meterscheiten als 1,0 gesetzt ist, so dass alle übrigen Maße sich auf dieses Maß beziehen.

Bei den Auswertungen wurden die Bestimmungen vom Frühjahr und vom Herbst 2004 zusammengefasst, zumal sich bei den Sortimenten aber auch bei den für Rundlinge noch zusätzlich durchgeführten Mittendurchmesserbestimmungen gezeigt hatte, dass durch die 6-monatige Lagerung und Trocknung noch keine messbare Schrumpfung eingetreten und auch die Wassergehalte kaum nennenswert unter den hierfür kritischen Fasersättigungspunkt gefallen waren (vgl. Kapitel 5.4.2). Für die Feststellung der Umrechnungsfaktoren wäre eine mögliche Schrumpfung ohnehin belanglos gewesen, da diese Faktoren als Quotient zweier Aufbereitungsformen aus ein und derselben Ursprungsmenge einer Charge errechnet worden waren. Da eine mögliche Schrumpfung sich auf alle Aufbereitungsformen proportional ausgewirkt hätte, wäre dieser Effekt ohne Wirkung auf das Ergebnis geblieben. Somit konnten sämtliche Messungen vom Herbst als Wiederholungen der Frühjahrmessungen ausgewertet werden.

Für die Messungen des Schüttgut-Sortiments (33-er Scheite) ließ sich ebenfalls kein klarer Trend zu eventuellen Unterschieden zwischen der Gitterbox und dem Messrahmen ableiten, daher wurden diese Werte ebenfalls zusammengefasst und als Gesamtmittelwert für die geschütteten 33-er Scheite ausgegeben. Die vollständigen Messwerte werden im Anhang 10.4 nach Messzeitpunkt und Behälterart differenziert zusammengestellt.

Die Ergebnisse in Abb. 98 zeigen, dass ein Raummeter Brennholz in Form von geschichteten 33-cm-Scheiten aus durchschnittlich 0,62 Fm Buchenholz bzw. 0,64 Fm Fichtenholz hervorgeht. Während hier somit kaum Unterschiede festzustellen sind, muss bei den übrigen Sortimenten stärker zwischen den beiden gemessenen Baumarten differenziert werden. Am Beispiel der Umrechnung für gespaltenes geschichtetes Meterholz wird dieser Holzarteneinfluss ersichtlich. Für einen Raummeter geschichtete 33-cm-Scheite werden 1,16 Rm Fichten-Meterscheite aber 1,23 Rm Buchenmeterscheite benötigt. Umgekehrt bedeutet dies, dass ein Brennholzkunde, der beim Brennholzhändler einen Raummeter ofenfertiges Buchenholz bestellt und hierbei die im Handel häufig geltende Bemessungsgrundlage des gespaltenen aber noch nicht ofenfertig geschnittenen Meterscheitholzmaßes vereinbart, bei der Auslieferung im geschnittenen Zustand als 33-er Scheite nur noch 0,81 Rm erhält, während es beim Fichtenholz noch 0,86 Rm sind. Diese Zahlen errechnen sich aus dem Kehrwert der in Abb. 98 dargestellten Umrechnungsfaktoren, sie können aber auch aus Abb. 99 oder aus der vollständigen Zusammenstellung aller Umrechnungsfaktoren für unterschiedliche Bezugsgrößen in Tab. 30 abgelesen werden.

Genau umgekehrt sind die Verhältnisse bei lose geschütteten Scheiten, wenn diese – wie in Kapitel 4.4.3 dargestellt – über ein Förderband aus 2,50 m Höhe in einen Behälter fallen. Hier ist der spezifische Raumbedarf der Fichtenscheite mit dem 1,62-fachen höher als bei Buchenscheiten, die nur das 1,48-fache des geschichteten Raummaßes benötigen (Abb. 98).

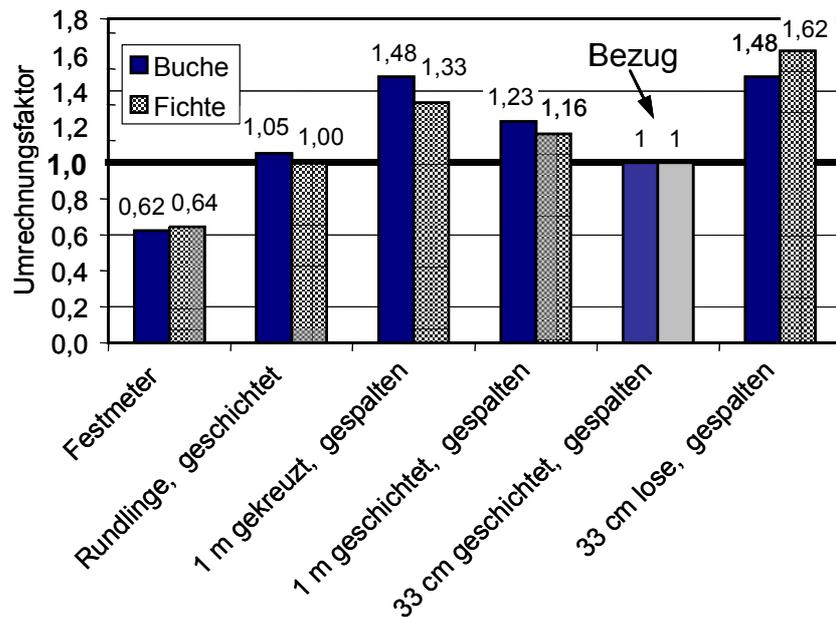


Abb. 98: Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Sortimenten und Lagerformen, hier: bezogen auf einen Raummeter 33-cm-Scheite, geschichtet

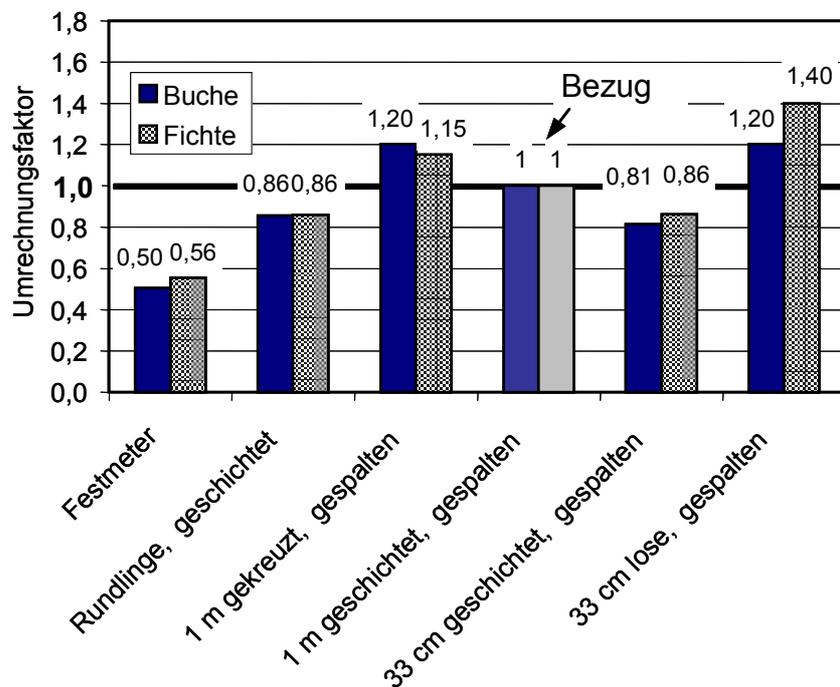


Abb. 99: Umrechnungsfaktoren zwischen verschiedenen Sortimenten und Lagerformen, hier: bezogen auf einen Raummeter (Rm) gesplante Meterholz-scheite, geschichtet

Insgesamt zeigen die dargestellten Ergebnisse (Abb. 98, Abb. 99), dass die Umrechnungsfaktoren nicht ohne weiteres für verschiedene Holzarten einheitlich verwendet werden können. Als Gründe für die hier festgestellten Unterschiede ist ein Zusammenspiel mehrerer Holzeigenschaften zu vermuten.

Zum einen sind die Rohdichten der Hölzer sehr verschieden (Buche 0,68 und Fichte 0,43 g/cm³, vgl. [41]) dies könnte sich z. B. beim Schüttgut-Raummaß ausgewirkt haben, da die Scheite beim Herabfallen aus 2,5 m Höhe (vgl. Kapitel 4.4.4) eine größere Wucht und damit größere Erschütterung auf die darunter liegende Holzschicht ausüben, was zur platzsparenderen Neuausrichtung der darunter liegenden Schichten geführt haben könnte. Zudem ist die Holzoberfläche der beiden Holzarten verschieden, was mit der Rauigkeit der Rinde zusammenhängen könnte. Auch hier könnte die höhere Rauigkeit der Fichte zu einer stärkeren Vernetzung der Scheite im Schüttgut geführt haben, während sich die glatteren Oberflächen der Buchenscheite möglicherweise platzsparender gegeneinander verschieben ließen.

Beim manuellen Schichten werden die Scheite dagegen in vorgegebener Orientierung abgelegt, so dass derartige Unterschiede durch den Benutzer ausgeschaltet werden. Das zeigt sich auch an den Ergebnissen, die für die Fichte sogar eine effizientere Raumausnutzung aufzeigen als für die Buche. Auch hierfür lassen sich möglicherweise typische Holzmerkmale als Begründung heranziehen. Beispielsweise ist von einem unterschiedlichen Wuchs auszugehen (z. B. Astigkeit, gekrümmtes Wachstum, unterschiedliche Querschnittsformen). Dies könnte bei der Fichte dazu geführt haben, dass es aufgrund ihrer gleichmäßigeren Holzgeometrie und evtl. auch wegen einer stärker parallelen Spaltführung beim Zerkleinern zu einer platzsparenderen Ablage im Stapel bzw. weniger Hohlagerung kommt.

Die Differenz der Schüttraummaße verschiedener Holzarten war im Versuch schon mit bloßem Auge deutlich erkennbar, das zeigt das Beispiel von geschütteten 33-er Scheiten in einer Gitterbox in Abb. 100. Der Inhalt beider Boxen war aus je einem Raummeterbündel durch jeweils gleiches Spalten und Sägen hervorgegangen, jedoch zeigt sich für die Fichtenscheite eine deutlich größere Füllhöhe als für die Buchenscheite.



Abb. 100: *Unterschiedliche Füllhöhe von 33-er Scheiten verschiedener Holzarten aber gleicher Ausgangsmengen (Rohholzvolumen). links: Buche; rechts: Fichte*

Ebenfalls deutliche Unterschiede ergeben sich auch zwischen den Sortimenten, unabhängig von der gemessenen Holzart. Vor allem zwischen den gestapelten 33-cm-Scheiten und den ebenfalls gestapelten Meterscheiten besteht eine relativ große Differenz, obwohl hier lediglich die Scheitlänge variiert und der (minimale) Masseverlust durch den zweifachen Sägeschnitt hier vernachlässigt wurde (Kapitel 4.5.4.2). Für die Ablage von einem Raummeter 33-er Scheite werden bei Buchenholz 1,23 Rm gespaltene Meterscheite benötigt, das ist etwas mehr als bei der Fichte (1,16 Rm). Diese Zahlen verdeutlichen, dass sich kürzere Scheite platzsparender, das heißt mit weniger Zwischenraum, schichten lassen. Dies liegt daran, dass kurze Scheite gleichförmiger sind und dass Unebenheiten und Biegungen im Holz bei kurzen Scheiten mit kurzer Auflage weniger große Hohlräume bilden als längere Scheite. Aus einem sichelförmig gebogenen Meterscheit entstünden beispielsweise durch das zweifache Sägen drei kurze Scheite mit einer sehr viel geringeren Hohllage. Bei der Fichte ist die Differenz zwischen Meterscheiten und 33-er Scheiten weniger stark ausgeprägt, da die Fichtenmeterscheite generell schon gleichförmiger sind. Eine vollständige Zusammenstellung aller Umrechnungsfaktoren für unterschiedliche Bezugsgrößen ist in Tab. 30 dargestellt.

Für die Praxis ergibt sich hieraus die Forderung, dass der Brennstoffhandel gegenüber den Kunden die Bezugsbasis für seine Preisfestlegung eindeutig mitteilen sollte, damit Missverständnisse und Verwirrungen über die Bemessung der Lieferung bei einer späteren Volumenbestimmung durch den Kunden vermieden werden können. Generell ist außerdem festzuhalten, dass eine korrekte Umrechnung in andere Sortimente und Lagerarten für Brennholz ohne eine Unterscheidung nach Holzart ungenau bleibt. Inwieweit die Gruppe der Laubbölzer und die Gruppe der Nadelhölzer durch die hier gewählten Baumartenvertreter Buche bzw. Fichte ausreichend repräsentiert werden, kann derzeit nicht beurteilt werden. Allerdings erscheint eine Übertragung der hier vorge-

stellten Umrechnungsfaktoren auf die Gesamtheit aller harten Laubhölzer bzw. weichen Nadelhölzer zielführender und genauer zu sein, als eine einfache und undifferenzierte Verwendung von Mittelwerten, die sich aus den hier genannten Umrechnungsfaktoren errechnen ließen.

Tab. 30: Umrechnungsfaktoren für Raum- und Festmetermaße, bezogen auf unterschiedliche Grundsortimente (mit Rinde)

Holzart	Festmeter (Fm)	Rundlinge geschichtet (Rm)	gespalten 1 m, gekreuzt (Rm)	gespalten 1 m, geschichtet (Rm)	Scheite 33 cm, geschichtet (Rm)	Scheite 33 cm, lose geschüttet (SRm)
<i>bezogen auf einen Festmeter (mit Rinde):</i>						
Buche	1,00	1,70	2,38	1,98	1,61	2,38
Fichte	1,00	1,55	2,07	1,80	1,55	2,52
<i>bezogen auf einen Raummeter Rundlinge:</i>						
Buche	0,59	1,00	1,40	1,17	0,95	1,40
Fichte	0,65	1,00	1,34	1,16	1,00	1,63
<i>bezogen auf einen Raummeter gespaltener Meterscheite:</i>						
Buche	0,50	0,86	1,20	1,00	0,81	1,20
Fichte	0,56	0,86	1,15	1,00	0,86	1,40
<i>bezogen auf einen Raummeter gestapelter 33-er Scheite (gespalten):</i>						
Buche	0,62	1,05	1,48	1,23	1,00	1,48
Fichte	0,64	1,00	1,33	1,16	1,00	1,62
<i>bezogen auf einen Schüttraummeter 33-er Scheite (gespalten):</i>						
Buche	0,42	0,71	1,00	0,83	0,68	1,00
Fichte	0,40	0,62	0,82	0,72	0,62	1,00

Zur Beurteilung der hier verwendeten Messmethode ist es sinnvoll, die Wiederholbarkeit der Einzelbestimmungen zu beurteilen. Tab. 31 zeigt dazu die Variationskoeffizienten der drei Einzelmessungen des Ausgangsmaterials im Messrahmen (vgl. 4.4) mit Minimal- und Maximalwerten. Es zeigt sich, dass die Variationskoeffizienten der Mittelwerte mit 0,34% (Fichte, 33 cm gespalten, geschichtet) bis 5,88% (Buche, 33 cm lose, gespalten, Gitterbox) relativ niedrig sind, so dass für das Messverfahren eine hohe Zuverlässigkeit festzustellen ist. Bei der Fichte war auf Grund der größeren Gleichförmigkeit des Ausgangsmaterials die Messgenauigkeit etwas höher, in einem Fall kam es sogar zu exakt den gleichen Messwerten bei den drei Einzelmessungen (vgl. VK=0%, bei "Min" für Fichte 33 cm geschichtet, gespalten). Erwartungsgemäß ist die Wiederholbarkeit bei den geschütteten Sortimenten etwas geringer.

Tab. 31: *Relative Variationskoeffizienten (VK in %) der Wiederholungsmessungen im Messrahmen bzw. in der Gitterbox*

Sortimente	Buche			Fichte		
	VK (%) Mittelwert	VK (%) min	VK (%) max	VK (%) Mittelwert	VK (%) min	VK (%) max
Rundlinge, geschichtet	2,67	1,28	4,76	1,08	0,58	1,36
1 m geschichtet, gespalten	1,06	0,54	1,78	1,42	0,28	2,52
33 cm geschichtet (gespalten)	1,01	0,73	1,28	0,34	0,00	0,68
33 cm lose, Gitterbox	5,88	4,25	7,51	2,74	1,91	3,57
33 cm lose, Messrahmen	1,24	1,00	1,48	2,61	1,24	3,99

Die Umrechnungsfaktoren wurden aus den dimensionslosen Verhältniszahlen der einzelnen Sortimente (Volumina) zueinander gebildet (vgl. Kapitel 4.4). Tab. 32 zeigt die Mittelwerte der Variationskoeffizienten, errechnet aus den einzelnen Verhältniszahlen der Sortimente zum Ausgangsmaterial. Im Vergleich zu Tab. 31 werden in Tab. 32 somit die Unterschiede zwischen den Chargen einer Holzart betrachtet und nicht – wie in Tab. 31 – die Wiederholbarkeit der Volumenbestimmung beim Stapeln oder Schütten selbst. Auch bei diesen Berechnungen liegt der Variationskoeffizient (VK) für die Fichtenchargen im Vergleich zur Buche niedriger. Die VK-Werte von 6 bis 7,5% für Messungen an Fichte und 7,3 bis 8,8% für Messungen an Buche deuten insgesamt auf einen relativ geringen Chargeneinfluss hin. Allerdings ist hierdurch keine Aussage möglich, in wie weit das verwendete Ausgangsmaterial als repräsentativ für die Gesamtheit aller Brennholz-Rohsortimente gelten kann. Bei den hier durchgeführten Messungen war Holz mit einem mittleren Durchmesser von 12,2 cm (Buche) bzw. 11,7 cm (Fichte) verwendet worden (zum Probenumfang und zur Methodik vgl. Kapitel 4.4).

Tab. 32: *Relative Variationskoeffizienten (VK in %) der Abweichungen zwischen den berechneten Verhältniszahlen (Umrechnungsfaktoren) für die einzelnen Sortimente (Anzahl Chargen je nach Materialmenge zwischen 4 und 6 Chargen, vgl. Kapitel 4.4.4)*

Sortimente	Buche	Fichte
	VK (%) Mittelwert	VK (%) Mittelwert
Rundlinge, geschichtet	8,26	6,65
1 m geschichtet, gespalten	8,81	6,03
33 cm geschichtet, gespalten	7,90	6,22
33 cm lose, gespalten, Gitterbox	7,35	6,01
33 cm lose, gespalten, Messrahmen	8,38	7,50

5.8.2 Vergleich mit Literaturangaben

Die bislang verwendeten Umrechnungsfaktoren für Brennholzsortimente und -Lagerarten sind im wesentlichen zwei Quellen zuzuordnen. In Deutschland wird für Brennholz häufig als pauschaler Umrechnungsfaktor vom Raummeter (gestapelt) zum Festmeter ein Wert von 0,7 verwendet, als Quelle ist hierfür beispielsweise BML [11] zu nennen, der Faktor wird aber auch in anderen Quel-

len – jedoch ohne direkten "Brennholzbezug" – identisch verwendet und stammt möglicherweise auch aus einer einheitlichen Ursprungsquelle (vgl. hierzu z. B. [8] und [49]). Er erlaubt eine Umrechnung von Massivholz (Fm) in sogenanntes "Schichtholz" und umgekehrt, wobei nicht differenziert wird, ob es sich beim Schichtholz um Rundlinge, gespaltene Meterscheite oder ofenfertige Kurzscheite handelt.

Außerdem ist eine Umrechnungstabelle aus Österreich bekannt [49], in der Umrechnungsfaktoren genannt werden zwischen den Sortimenten "Rundholz" (in Fm, gemeint ist Massivholz), geschichtete "Meterscheite" (wobei offen bleibt, ob hierzu auch Rundlinge zählen), und ofenfertiges "Stückholz" – sowohl in gestapelter als auch in lose geschütteter Form, wobei die Scheitlänge hier ungenannt bleibt. In beiden Umrechnungstabellen bzw. Quellen erfolgt keine Differenzierung nach Holzarten. Nach Rücksprache mit den Autoren ist festzustellen, dass eine Dokumentation über das Zustandekommen dieser Umrechnungszahlen nicht vorliegt.

Eine Gegenüberstellung dieser relevanten Literaturangaben mit den hier vorgestellten Ergebnissen zeigt Tab. 33. Darin wurden die im Versuch bestimmten Umrechnungen für kreuzweise geschichtete Meterscheite nicht dargestellt, da hierzu keine direkten Vergleichsmöglichkeiten mit anderen Quellen vorliegen. Die Zusammenstellung zeigt, dass eine Übereinstimmung zwischen den TFZ-Ergebnissen und den pauschal für Schichtholz zu verwendenden Umrechnungsfaktoren des BML [11] nur eingeschränkt besteht. Sie ist für Fichtenholz besser als für Buchenholz, jedoch führt die Umrechnung mit den BML-Werten durchweg zu einer Unterschätzung des aus den Massivholz-Festmetern geschätzten Schichtholzvolumens. Das gilt umso mehr, wenn der Faktor nicht nur für Rundlinge sondern auch für gespaltene Meterscheite verwendet wird, zumal eine genaue Spezifikation in der Quelle fehlt.

Tab. 33: *Vergleich der im Versuch ermittelten Umrechnungsfaktoren mit entsprechenden Angaben aus der Literatur (Quellen: BML [11] und LWK [49], Literaturangaben zur kreuzweisen Schichtung liegen nicht vor, daher hier keine Darstellung)*

Massivholz (Fm)				(ungespalten) ^a Rundlinge 1 m (Rm)			(gespalten) ^b 1 m geschichtet (Rm)			ofenfertig (33 cm) ^c geschichtet (Rm) ^d			ofenfertig (33 cm) ^c lose geschüttet (Rm) ^d		
TFZ	BML	LWK		TFZ	BML ^c		TFZ	LWK	TFZ	LWK		TFZ	LWK		
Bu	Fi	–	–	Bu	Fi	–	Bu	Fi	–	Bu	Fi	–	Bu	Fi	–
1,0	1,0	1,0	1,0	1,70	1,55	1,43	1,98	1,80	1,40	1,61	1,55	1,20	2,38	2,52	2,00
0,59	0,65	0,7	–	1,0	1,0	1,0	1,17	1,16	–	0,95	1,00	–	1,40	1,63	–
0,50	0,56	–	0,70	0,86	0,86	–	1,0	1,0	1,0	0,81	0,86	0,80	1,20	1,40	1,40
0,62	0,64	–	0,85	1,05	1,00	–	1,23	1,16	1,20	1,0	1,0	1,0	1,48	1,62	1,70
0,42	0,40	–	0,50	0,71	0,62	–	0,83	0,72	0,70	0,68	0,62	0,60	1,0	1,0	1,0

^a bei BML: Festmeterangabe ohne Rinde, jedoch keine nähere Angabe zum Raummaß-Sortiment (Rundling, gespalten oder Kurzscheite). Aufgrund der gegebenen Wahrscheinlichkeit wurde die Zahlenangabe den ungespaltenen Meterscheiten (Rundlingen) zugeordnet.

^b bei LWK: keine Angabe ob gespalten oder ungespalten. TFZ: gespalten

^c bei LWK: keine Angabe der Scheitlänge. TFZ: 33 cm Scheite, gespalten

Auch zwischen TFZ- und LWK-Werten bestehen zum Teil gravierende Unterschiede. Das gilt vor allem für die Umrechnung vom Massivholz in Meterscheitholz, wobei mit den LWK-Werten deutlich geringere Volumenausbeuten durch die Aufbereitung von Massivholz errechnet werden. Diese liegen sogar noch unter den Werten des BML, die hier – ohne nähere Angaben, daher mit Vorbehalt – dem platzsparenderen Rundholzsortiment zugeordnet wurden. Für die TFZ-Werte kann angegeben werden, dass es sich hierbei um typische Brennholz-Rohsortimente (mit Rinde) mit mittleren Durchmessern von 12,2 cm (Buche) bzw. 11,7 cm (Fichte) handelt, bei denen die Festmeterbestimmung durch Kreuzklappung des Mittendurchmessers festgestellt wurde (zum Probenumfang und zur Methodik vgl. Kapitel 4.4.4. Für die LWK-Werte liegen keine näheren Angaben über das Zustandekommen vor.

Eine wesentlich bessere Übereinstimmung besteht aber zu den übrigen LWK-Werten, wobei einschränkend erwähnt werden muss, dass bei den Meterscheiten eine eindeutige Definition des "Meterscheitholz"-Sortiments nicht vorliegt. Beispielsweise stimmt die Umrechnung von gespaltene Fichtenmeterscheiten in geschichtete Kurzscheite vollständig mit den TFZ-Messungen überein, jedoch gilt dies nicht für Buchenholz. Auch die Umrechnung von geschichteten Kurzscheiten in lose geschüttete Kurzscheite ist einigermaßen übereinstimmend für Fichtenholz, nicht jedoch für Buchenholz. Zum Teil vorhandene Unterschiede können auch auf die bei LWK offenbar teilweise durchgeführte Rundung auf nur noch eine Dezimalstelle zurückgeführt werden.

Diese Vergleiche legen nahe, dass es sich bei den LWK-Werten um Angaben für Fichtenholz (oder Nadelholz allgemein) handelt. Genauere Angaben liegen nicht vor, auch in der vermuteten ursprünglichen Datenquelle für die LWK-Angaben, der HOMA (Holzmessanweisung von 1936 [1]), erfolgt hierzu keine Holzartennennung. Was jedoch bei der HOMA und später auch noch bei PRODAN (1951) [52] auffällt, sind die differenzierten Angaben zur Umrechnung der einzelner Sortimente, hier wird beispielsweise zusätzlich noch zwischen Schichtderbholz oder Schichtreiserholz unterschieden. Bei späteren Zahlenangaben in anderen Quellen werden diese zusätzlichen Umrechnungsfaktoren jedoch weggelassen. Diese liegen jedoch niedriger, als die Angaben für aufbereitetes Schichtholz, beispielsweise wird in der HOMA für Nutzreiserprügel mit Rinde ein Umrechnungsfaktor von 0,50 Rm/Fm genannt.

Der bisher angewendete pauschale Faktor von 0,7 für das Umrechnen von Raummeter Schichtholz in Festmeter ohne Rinde bzw. 0,8 für die Umrechnung von Holz mit Rinde ist schon der Holzmessanweisung (HOMA) aus dem Jahr 1936 zu entnehmen, er findet sich auch in den Rohholzsortierungsbestimmungen für den Gebrauch im bayerischen Staatswald [8] ohne weitere Anmerkung. Bei KRAMER UND AKÇA [34] wird dieser Faktor ebenfalls genannt, jedoch sollte er den Autoren zufolge nur für statistische Zwecke Verwendung finden. Im Kommentar zur HOMA bei KNIGGE UND SCHULZ [32] verweisen die Autoren darauf, dass eine Umrechnung von Schichtholz auf Festmeter mit Hilfe der Umrechnungsfaktoren den tatsächlichen Gehalt an Holzmasse relativ ungenau wiedergeben. Die Autoren machen eine Reihe von Verbesserungsvorschlägen für die Messmethode zur Rohholzvolumenbestimmung, beispielsweise das sektorenweise Kluppen oder keine Zugaben bei Längenmessungen etc. Diese Vorschläge wurden in der vorliegenden Untersuchung bereits berücksichtigt.

Interessant ist auch ein Vergleich der Umrechnungsfaktoren von Schüttraummeter des Scheitholz und von Hackschnitzel zum Festmeter, da sich der Umrechnungsfaktor der Hackschnitzel (unspe-

zifiziert, also ohne genaue Nennung der Baumart) mit 2,43 SRm/Fm [22] genau zwischen den Faktoren für Scheitholz mit 2,52 SRm/Fm (Fichte) und 2,38 SRm/Fm (Buche) liegt. Ob hier eine Gesetzmäßigkeit vorliegt und somit für alles Holz verschiedener Länge (verschiedene Scheitholz-längen, Grobhackgut) der Umrechnungsfaktor von ca. 2,4 SRm/Fm gilt, kann mit dem vorhandenen Datenmaterial weder bestätigt noch widerlegt werden und bedarf weiterer Studien zu diesem Thema.

1,50 Rm/Fm ist nach Krottenthaler ## der Umrechnungsfaktor von Schleifholz (Fichtenholzprügel mit 2 m Länge, ungespalten, bei diesem Faktor in Rinde). Dieser Faktor liegt damit um fünf Hundertstel unter dem neu ermittelten Wert für Scheitholz von 1,55 Rm/Fm, aber immer noch ein Zehntel über dem alten Faktor, der 1,40 Rm/Fm beträgt. Die Unterschiede sind zum einen die Länge des Holzes (2 m beim Schleifholz, 1 m beim Scheitholz) und zum anderen die Messgenauigkeit der Höhe beim Ermitteln der Raummeter (5 cm beim Schleifholz, 1 cm bei Scheitholz). Damit sind sie exakt vergleichbar. Dennoch darf dieser Wert als Indiz gelten, dass bei der Ermittlung der Raummeter auf die Unterscheidung der Sortimente und der Baumart Wert gelegt werden sollte.

Die neu bestimmten Umrechnungsfaktoren haben Auswirkungen auf die Berechnung der im jeweiligen Sortiment enthaltenen Energiemenge. In bisherigen Faustzahlentabellen wurden üblicherweise lediglich der Wassergehalt und die Rohdichte als Einflussgrößen berücksichtigt, während die Umrechnung von Festmeter in Raummeter anhand eines pauschalen Faktors (vgl. Tab. 33) für alle gestapelten Sortimente einheitlich erfolgte (vgl. u.a. [8],[49]). Zukünftig sind hierzu differenzierte Betrachtungen je nach Aufbereitungs- und Lagerform erforderlich. Derartige differenzierte Neuberechnungen sind in Tab. 34 zusammengestellt.

Tab. 34: *Energieinhalte der hier untersuchten Sortimente für Fichten- und Buchenholz bei verschiedenen Wassergehalten (zu den hier verwendeten Umrechnungsfaktoren von Festmeter in die Raummetermaße vgl. Tab. 30)*

	Energieinhalt in Litern Heizöläquivalent (l OE) ^b						
	Wasser- gehalt w	Heiz- wert ^a	Fest- meter ^c	1 m unge- spalten	1 m ge- spalten	33-cm Scheite geschichtet	33-cm Scheite lose (geschüttet)
	%	MJ/kg	l OE/Fm	l OE/Rm	l OE/Rm	l OE/Rm	l OE/Rm
Buche, ofenfertig	15	15,27	304	179	154	189	128
Buche, angetrocknet	30	12,15	269	158	136	167	113
Fichte, ofenfertig	15	15,53	204	131	113	131	81
Fichte, angetrocknet	30	12,36	186	120	103	120	74

^a Heizwerte (wasserfrei) nach NAWARO Datenbank des TFZ [24]: Buche 18,4 MJ/kg und Fichte 18,7 MJ/kg

^b Umrechnung: 1 Liter Heizöl (l OE) entspricht 10 Kilowattstunden (kWh) oder 36 Megajoule (MJ)

^c Rohdichten (wasserfrei) für Buchen- und Fichtenholz: 0,68 bzw. 0,43 g/cm³ gemäß [41] bei der Dichteberechnung für den angegebenen Wassergehalt wurde ab dem jeweiligen Fasersättigungspunkt eine lineare Schwindung und ein Schwindmaß von 17,9% (Buche) bzw. 11,9% (Fichte) angerechnet [41], damit beträgt die tatsächliche Dichte des Fichtenholzes bei 15 und 30% Wassergehalt 0,425 bzw. 0,516 g/cm³ und bei Buchenholz 0,716 bzw. 0,798 g/cm³.

5.8.3 Fehlerbetrachtungen

Die neuen Umrechnungsfaktoren deuten zwar auf eine höhere Volumenausbeute für Scheitholz je Festmeter hin, im Umkehrschluss ist aber auch die berechnete Energiemenge, die nun einem Raummeter geschichtetes Holz zugeordnet werden kann, durch das geringere berechnete Rohholzvolumen geringer als bei Verwendung der bisherigen pauschalen Faktoren (vgl. hierzu Tab. 34). Aufgrund der weitreichenden Bedeutung der hier erfolgten Neufestlegung sollen nachfolgend einige Betrachtungen über die gegebenen Messunsicherheiten bei der gewählten Bestimmungsmethode angestellt werden.

Das für die vorliegende Untersuchung verwendete Holz stammt aus einer Jungdurchforstung, da hier die für Brennholz typischen Sortimente anfallen. Die Fichten- und Buchenrundhölzer wiesen einen Durchmesser von 6 cm bis maximal 25 cm auf, dieser Bereich wurde in der Untersuchung als repräsentativ angesehen. Bei größeren Durchmessern besteht die Möglichkeit, dass das Holz durch seinen weniger gekrümmten Wuchs weniger hohl lagert und sich somit ein günstigerer Festmetergehalt je Raummeter errechnet. Bei kleineren Durchmessern trifft das Gegenteil zu, diese Trends gelten vor allem für die eher gekrümmtwüchsigen Laubholzsortimente. Inwieweit das hier verwendete Ausgangsmaterial repräsentativ für die Gesamtheit der Brennholz-Rohsortimente gelten kann, ist kaum zu bewerten.

Die Volumenbestimmung wurde hier durch sektionsweise (1 m) Kluppung vorgenommen. Im Vergleich zur Volumenbestimmung längerer Hölzer ist ein möglicher Messfehler durch die Abholzigkeit der Bäume hierbei noch zu vernachlässigen. Allerdings könnte diese Messunschärfe eine Rolle spielen, wenn der bisher verwendete pauschale Umrechnungsfaktor (dessen Zustandekommen nicht nachvollzogen werden kann) auf Basis von Langholzvolumina errechnet worden wäre. Deutlichere Messabweichungen könnten durch die hier bei der Kluppung durchgeführte forstliche Abrundung auf ganze Zentimeter (Kapitel 4.4.2) verursacht worden sein, obgleich dieses Vorgehen für die Bestimmung des pauschalen Umrechnungsfaktors ebenfalls als sehr wahrscheinlich angenommen werden kann. Durch die forstliche Abrundung kommt es zu einer systematischen Abweichung bei der Durchmesserbestimmung, wobei der prozentuale Fehler mit zunehmendem Durchmesser abnimmt. Dieser systematische Fehler liegt im Durchschnitt zwischen -3% und -6% [34]. Werden die Volumina der verwendeten Holzrundlinge mit der Erhöhung des Durchmessers mit dem durchschnittlichen Fehler bei der Kluppung von 0,45 cm (0,1 cm bis 0,9 cm werden abgerundet; im Mittel folglich 0,45 cm) neu berechnet, so wirkt sich dieser Fehler auf den Umrechnungsfaktor für Rundholz mit bis zu vier Hundertstel Erhöhung aus (hier z. B. von 0,60 auf 0,64 Fm/Rm).

Da Brennholz meist "in Rinde" gehandelt und verbrannt wird, wurde kein Rindenabzug berechnet. Dies erklärt sich dadurch, dass der Unterschied der Heizwerte (Rinde ##MJ/kg; Fichtenholz 18,7 MJ/kg) durch den geringen Rindenanteil trotz Erhöhung des Ascheanteils (Rinde ##%; Fichtenholz ##% ##) zu vernachlässigen ist, denn der Aufwand der Entrindung wäre bei Brennholzsortimenten zu hoch. Dennoch wurde eine stichprobenhaften Messung durchgeführt. Dabei stellte sich heraus, dass die Rinde bei den vorliegenden Rundhölzern ca. 0,5 cm stark war. Wenn für die Umrechnungsfaktoren ein Festmeterwert "ohne Rinde" gesucht würde, so verschöbe sich der Faktor für Rundholz um drei Hundertstel nach unten (z. B. von 0,60 auf 0,57 Fm/Rm). Beim Schleifholz ist Entrinden üblich. Die Rinde macht dabei am Rundholz einen Anteil von ca. 10% aus [35].

Beim Verkauf von Schichtholz im Wald ist von forstlicher Seite normalerweise ein Übermaß von 4% vorgeschrieben [34]. Diese Gepflogenheit wurde hier nicht berücksichtigt. Ein Messfehler (oder Übermaß) von einem Zentimeter würde sich bei der hier verwendeten Messmethode im Messrahmen beim Umrechnungsfaktor erst in der dritten Nachkommastelle (ca. sechs Tausendstel) auswirken.

In gleicher Weise lassen sich die möglichen Randeffekte, d. h. eine möglicherweise höhere Hohlraumbildung an den Wandflächen des Stapelrahmens, beurteilen. Bei einer angenommenen Messunschärfe für beide Seitenwände und für die Füllhöhe von 1 cm, ergäbe das einen Einfluss von 18 Tausendstel auf den Umrechnungsfaktor. Das würde zum Beispiel für Rundholz einen Anstieg von 0,60 auf 0,618 Fm/Rm bedeuten. In der Praxis kommen sowohl Großstapel oder -schüttungen mit wenigen Randeffekten als auch Kleincontainersysteme (z. B. Gitterboxen oder Palettenkisten) mit ähnlichen Abmessungen wie beim hier für die Messungen verwendeten Stapelrahmen zur Anwendung. Inwieweit derartige Randeffekte tatsächlich eine relevante Größenordnung einnehmen und daher differenziert berücksichtigt werden sollten, kann hier nicht beurteilt werden. Die Randeffekte sind ohnehin nur relevant für die Umrechnung der Scheitholzsortimente in das Festmetermaß. Für eine Umrechnung der Holzsortimente untereinander spielen sie keine Rolle, da die Umrechnungsfaktoren die Quotienten der jeweiligen Volumina bei gleicher Ursprungsmenge darstellen, wodurch sich ein möglicher systematischer Messfehler nicht auswirken kann (vgl. Kapitel 4.4.4).

5.9 Prozesskettenanalyse

In den vorangehenden Kapiteln wurden die Ergebnisse zu den verschiedenen Teilverfahren und zum Teil auch differenziert nach deren Arbeitsablaufabschnitten dargestellt. Die Teilverfahren (z. B. Scheitholzaufbereitung) stellen aber letztlich stets nur einen Baustein einer vollständigen Verfahrenskette dar. Da sie sich außerdem auch auf die nachgelagerten Verfahrenselemente auswirken, ist eine abschließende Bewertung erst im Verbund mit den weiteren vor- oder nachgelagerten Verfahrensschritten möglich. Nachfolgend soll der Versuch einer aggregierten Gesamtbewertung unternommen werden, wobei unterschiedliche Bausteine einer Verfahrenskette beispielhaft miteinander kombiniert werden.

5.9.1 Ergebnisse der Befragung von Selbstwerbern

Um Anhaltspunkte für die bei Selbstwerbern typischen Verfahrensabläufe, die verwendeten Arbeitsgeräte sowie die sonstigen Rahmenbedingungen zu erhalten, wurde eine Umfrage durchgeführt. Dazu wurde eine Auswahl von Selbstwerber mittels eines Fragebogens zu ihren Produktionsmethoden befragt. Exemplarisch wurde hierfür der Staatswald des Freisinger Forstamtes ausgewählt. Die Fragen waren vom TFZ und der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft gemeinsam ausgearbeitet worden. Die jeweiligen Förster wurden gebeten mit den Selbstwerbern den Fragebogen auszufüllen und an die Landesanstalt zurückzusenden. Insgesamt beteiligten sich 81 Personen an der Erhebung. Sie stellt somit lediglich eine kleine Stichprobe dar, die aber eine grobe Orientierung für die im nachfolgenden Kapitel 5.9.2 vorgestellte Definition der Modellverfahrensketten bieten sollte. Die Ergebnisse der Befragung sind in Tab. 35 und in Abb. 101 und Abb. 102 zusammengestellt. Der vollständige Fragebogen findet sich im 10.2.

Tab. 35: *Ergebnisse der Befragung von Selbstwerbern. Die Reihenfolge entspricht den Nummern der Fragen im Fragebogen (vgl. Anhang 10.2). Durch Rundungsschärfen oder bei Mehrfachnennungen ergibt die Summe nicht immer genau 100%*

Nr.	Frage	Antworten					n ^b
1	welcher Bedarf?	Eigenbedarf 81%	Verkauf 3%	teils-teils 16%		81	
2	bei Eigenbedarf: welche Feuerung? ^a	Kaminofen 25%	Kachelofen 65%	Zentralheizung 12%	Heizungsherd 19%	98	
3	aufgearbeitete Baumarten ^a	Fichte 88%	Buche 19%	Eiche 12%	Pappel 7%	Sonst. 47%	140
4	Was wird aufgearbeitet? ^a	Hiebsreste 59%	Jungdurchf. 61%	gerückt.Holz 4%	Sonstiges 3%	102	
5	im Wald aufgearbeitete Länge	1 m 77%	50 cm 6%	33 cm 7%	25 cm 2%	Sonst. 7%	81
6	Länge des Endprodukts	1 m 1%	50 cm 13%	33 cm 66%	25 cm 18%	Sonst. 2%	81
7	Wie viele Raummeter pro Jahr?	bis 10 42%	11–20 38%	21–30 10%	31–40 1%	41 bis 70 6%	81
8	Von wo erfolgt Abtransport aus dem Wald?	Bestand 6%	Rückegasse 12%	Waldstraße 24%	gar nicht 57%		81
9	Wo wird verkaufsfertig gespalten?	Bestand 0%	Rückegasse 0%	Waldstraße 5%	zu Hause 94%	gar nicht 1%	81
10	Wo wird verkaufsfähig gelagert und getrocknet?	Bestand 0%	Rückegasse 0%	Waldstraße 0%	zu Hause 100%		81
11a	Dauer der Freilufttrocknung Hartholz (Jahre)	0,5 J 3%	1 J 5%	1,5 J 10%	2 J 33%	>2 J 48%	81
11b	Dauer der Freilufttrocknung Weichholz (Jahre)	0,5 J 3%	1 J 19%	1,5 J 31%	2 J 38%	>2 J 10%	81
12	Wie oft wird jährlich im Wald gearbeitet?	bis 2 mal 15%	3–5 mal 36%	>5 mal 49%		81	
13	Wie viele Jahre Erfahrung?	1–2 Jahre 6%	3–5 Jahre 17%	>5 Jahre 77		81	
14	Wie viele Personen sind im Wald dabei?	1 Pers. 7%	2 Pers. 24%	3 Pers. 52%	4 Pers. 17%	81	
15	Welche Maschinen werden verwendet? ^a	Motorsäge 100%	Traktor 56%	Seilwinde 5%	Sonstige 2%	132	
16	Transport vom Bestand zur Rückegasse ^a	manuell 94%	mit Seil 15%	Sonstiges 1%		89	
17	Transport an die Waldstraße ^a	PKW+Anh. 31%	Traktor+Anh. 64%	Sonstiges 9%		84	
18	Transport zum Lagerplatz ^a	PKW+Anh. 36%	Traktor+Anh. 63%	Sonstiges 4%		83	
19	Welche Maschinen für Spalten und Schneiden	siehe Grafik					
20	Geschätzter mittl. Zeitbedarf je Rm (Meterholz)	siehe Grafik					

^a Mehrfachnennungen möglich ^b gesamte Anzahl Nennungen (ggf. inkl. Mehrfachnennungen)

Die Ergebnisse in Tab. 35 zeigen, dass die deutlich überwiegende Mehrheit der hier befragten Selbstwerber (81%) das Holz nur für den Eigenbedarf bereitstellt. In der Mehrzahl wird es in Kachelöfen eingesetzt (65%), offenbar greifen die Kaminofenbesitzer, die bei den Feuerungsbetreibern generell deutlich überwiegen dürften und im Durchschnitt kleinere Mengen benötigen, eher auf andere Holzquellen zurück. Außerdem wird in derartigen Feuerungen bevorzugt das im Befragungsgebiet eher seltenere Hartholz eingesetzt. Das zeigt auch die Antwort auf die Frage nach den am meisten verwendeten Baumarten, bei denen die Fichte (88%) überwiegt, gefolgt von der Buche (19%). Als „Sonstige“ wurde meistens die Esche (*Fraxinus excelsior*) angegeben. Insgesamt halten sich die Hiebsreste/Käferholz (59%) und die Jungdurchforstung (61%) die Waage. Es wird kaum vorgerücktes Holz verwendet.

Im Wald wird erwartungsgemäß auf eine Länge von 1 m aufgearbeitet (77%) Unter „Sonstige“ wurden neben Sondermaßen wie beispielsweise 30 cm auch Fixlängen über 1 m (z. B. 2 m) angegeben. Die am meisten verwendete Scheitlänge für das ofenfertige Endprodukt ist 33 cm (66%). Manche Selbstwerber begnügen sich mit zwei Raummetern pro Jahr, andere wiederum stellen jährlich über 50 Raummeter bereit. Die typische Selbstwerberproduktion in Freising liegt jedoch bei ca. 15 Rm pro Jahr, denn 80% der Befragten liegen unter 20 Rm/a (Tab. 35).

Meistens wird das an die Waldstraße gerückte Holz direkt in den Transporter verladen und gar nicht erst vorher noch einmal aufgesetzt (57%). Es wird fast ausschließlich am heimatischen Lagerplatz verkaufsfertig gespalten (94%). Auch die Lagerung bis zur Endnutzung bzw. bis zum Verkauf erfolgt uneingeschränkt am Lagerplatz zu Hause (100%). Das Hartholz (Buche, Eiche, Esche etc.) wird dabei bis zum Einsatz- oder Verkaufszeitpunkt überwiegend zwei und mehr Jahre gelagert (81%). Beim Weichholz (Nadelbaumarten, Pappel, Weide) ist die Lagerungsdauer verkürzt, hier sind es nur noch 48% der Befragten, die über zwei und mehr Jahre lagern (Tab. 35).

Für die angegebenen Brennholzmengen müssen die Befragten überwiegend mehr als fünfmal im Wald arbeiten. Eine große Mehrheit (77%) hat bereits eine mindestens 5-jährige Erfahrung bei der Brennholzaufbereitung im Wald. Die meisten Selbstwerber arbeiten zu dritt bei der Holzernte (52%), aber ein kleiner Teil (7%) arbeitet trotz der Unfallgefahr immer noch allein. Alle Befragten besitzen eine Motorsäge. Nur sehr wenige Befragte (5%) setzen zusätzlich eine Seilwinde ein (Tab. 35).

Überwiegend wird das Holz von Hand (94%) aus dem Bestand herausransportiert. Für den Weitertransport an die Waldstraße kommen überwiegend Traktoren mit Anhängern (64%) aber auch PKW mit Anhängern (31%) zum Einsatz. Fast gleichartig erfolgt auch der Transport zum Lager- bzw. Aufbereitungsplatz. Dort wird immer noch sehr häufig die Axt oder der Spalthammer eingesetzt (22% bzw. 40%). Am meisten allerdings findet der hydraulisch betriebene Senkrechtpalter Verwendung (60%). Zum Ablängen wird die Kreissäge oder auch noch die Motorsäge verwendet. Nur sehr wenig wurde von den hier Befragten eine kombinierte Säge-Spalt-Maschinen eingesetzt (Abb. 101). Unter „Sonstige“ wurden „Bügelsäge“ und „Keil“ genannt. Bei der Einschätzung des Arbeitszeitbedarfs pro Raummeter gehen die Angaben naturgemäß weit auseinander, zumal hier auch Angaben für unterschiedliche Anzahl beteiligter Personen gemacht werden (vgl. Frage 14). Die Bandbreite reicht 0,2 Stunden bis zu zehn Stunden pro Rm, wobei Nennungen von 1 bis 2 Stunden relativ häufig sind (Abb. 102).

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Selbstwerber, die als wichtige Akteure bei der Scheitholzgewinnung einzuschätzen sind, sehr unterschiedlich vorgehen und auch eine unterschiedliche Maschinenausstattung besitzen. Zwar hat der Senkrechtpalter grobenteils die Axt abgelöst, jedoch werden nur wenige kombinierte Säge-Spaltmaschinen eingesetzt.

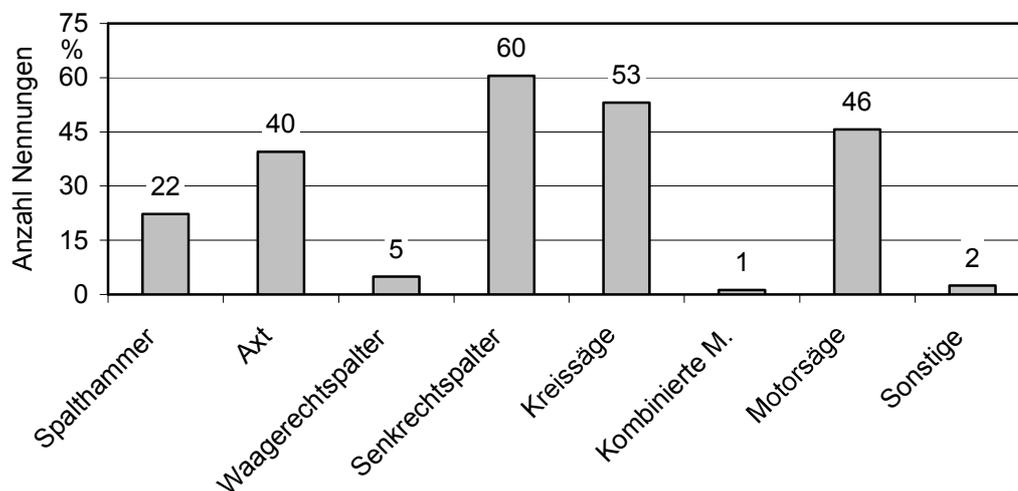


Abb. 101: Von Befragten verwendete Maschinen und Geräte beim Spalten

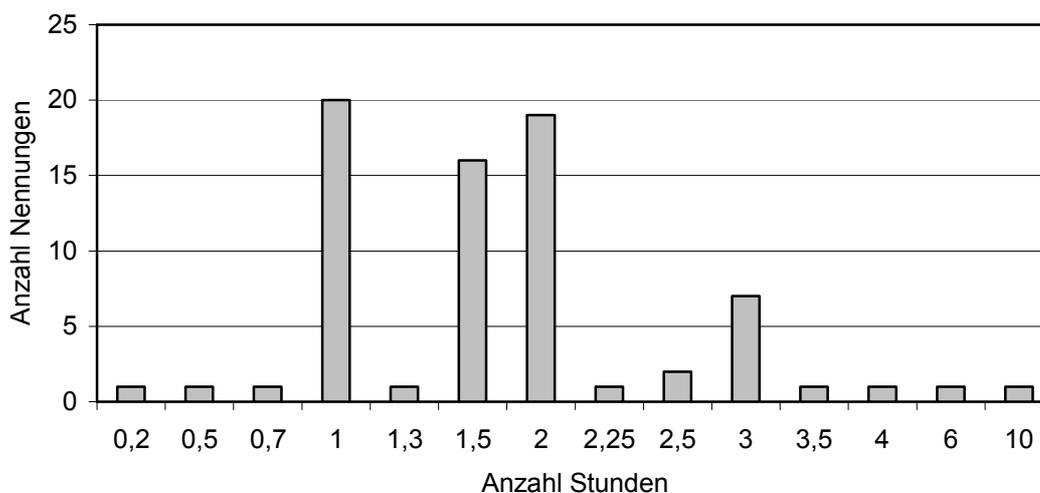


Abb. 102: Von Befragten geschätzter mittlerer Zeitbedarf je Rm Holzwerbung im Wald (Meterholz)

5.9.2 Identifikation von Grundverfahren (Modellverfahrensketten)

Aus der Vielfalt der Arbeitsabläufe wurden vier Scheitholzproduktionsketten gebildet und bestimmten Akteuren zugeordnet, die sich durch Gemeinsamkeiten bei der Scheitholzproduktion definieren. Die vier Scheitholzproduktionsketten unterscheiden sich in den Produktionszielen (z. B. Eigennutzung oder gewerbliche Holzproduktion) und somit auch im Grad der eingesetzten Mechanisierung. Letztlich wird davon natürlich auch die jährlich produzierte Menge an Scheitholz beeinflusst, die somit ein messbares Zuordnungsmerkmal darstellt. Abb. 103 zeigt die betrachteten Produktionspfade in einem Fließschema.

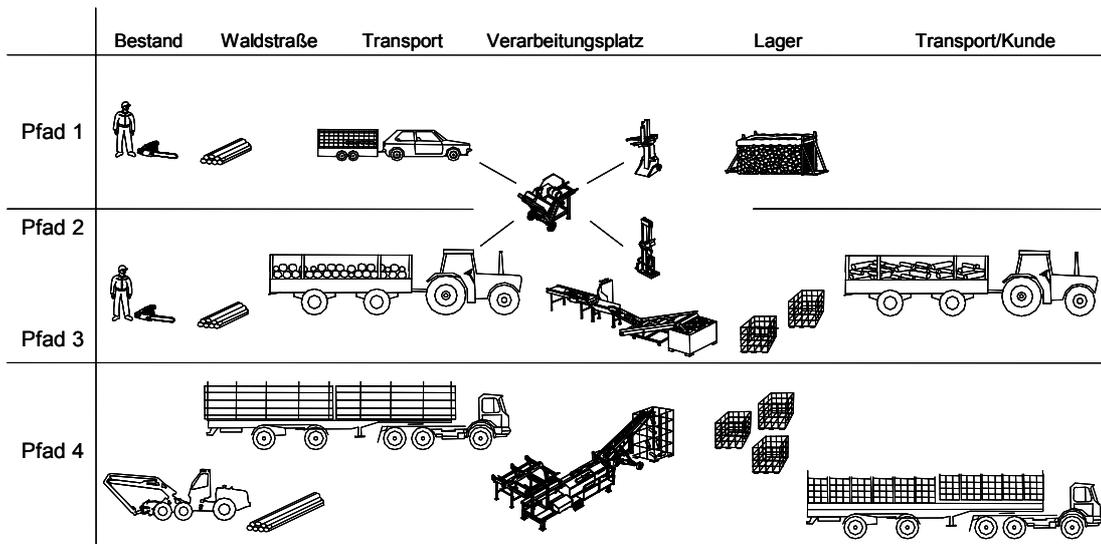


Abb. 103: Schema der unterschiedlichen Scheitholzbereitstellungsketten

Die Grenzen zwischen den Prozessketten sind fließend, so dass die hier getroffene Festlegung auf vier Modellfälle lediglich eine grobe Orientierung bietet, in der sich der Betrachter mehr oder weniger gut wiederfinden kann. Das liegt auch daran, dass für weitere Berechnungen zu den Prozessketten (vor allem bei den aggregierten Kosten, vgl. Kapitel 5.9.6.3) weitere Annahmen getroffen werden mussten, die den Modellfall charakterisieren. Generell kommen in den Aggregationen vor allem aber die in den vorangegangenen Kapiteln gemessenen Werte zur Anwendung.

Die vier definierten Prozessketten ("Pfade") werden nachfolgend vorgestellt und charakterisiert. Für alle Berechnungen wurde vereinfachend davon ausgegangen, dass die Entfernung vom Wald zur Hofstelle bzw. zum Aufarbeitungsplatz 2 km beträgt und dass diese Strecke sich zur Hälfte aus Wald-/Feldwegen sowie aus asphaltierten Straßen zusammensetzt.

Pfad 1: "Freizeit-Selbstwerber". Werden weniger als 15 Rm Scheitholz im Jahr produziert, so ist das Holz im allgemeinen ausschließlich für den Eigenbedarf bestimmt. Das Vorgehen und die Ausstattung an Maschinen ist weniger professionell. Der Akteur ist ein Selbstwerber, ausgestattet mit einer Motorsäge. Er fällt nur das ihm zugewiesene Schwachholz oder bedient sich der Holzernertereste. Das Holz wird in Meterstücken aus dem Bestand an die Waldstraße getragen. Der Transport erfolgt mit einem PKW-gezogenen Anhänger nach Hause. Dort wird das Holz mit der Motorsäge oder einer Kreissäge weiter gekürzt und dann entweder mit der Axt oder einem kleinen Senkrechtpalter gespalten, um es anschließend in einem Lager auf dem eigenen Grundstück geschichtet zu trocknen. Da diese Methode meist zur Selbstversorgung angewandt wird erfolgt kein weiterer Transport zum Kunden. In Stichworten ist die Verfahrenskette somit wie folgt zu beschreiben.

Pfad 1: Holzernte Selbstwerber (inkl. Rücken, Länge 1 m) → Beladen → Transport (PKW mit Anhänger) → Abladen (kippen) → Sägen (Brennholzkreissäge oder Motorsäge) → Spalten (kleiner Senkrechtpalter) → Schichten (inkl. Lagerung)

Pfad 2 "Waldbauer 1, gering mechanisiert". Bei einer Jahresproduktion zwischen 15 Rm und 200 Rm müssen verstärkt Rationalisierungsprozesse eintreten, um eine ausreichende Arbeitseffizienz zu erreichen. Der Akteur ist meist ein Landwirt mit eigenem Wald oder ein gewerblicher Brennholzhändler. Der Transport erfolgt mit Traktor und Anhänger zum Aufarbeitungsplatz, der sich meist auf dem Hofgelände befindet. Zum Ablängen kommt eine Motor- oder Kreissäge zum Einsatz und zum Spalten wird ein großer Spalter verwendet. Bei der Lagerung wird gespaltene Meterholz geschichtet und kürzere Scheite werden in Boxen geschüttet. Der Transport zum Kunden wird mit traktorgezogenen Anhängern durchgeführt, wobei eine mittlere Entfernung von 5 km (asphaltierte Straße) angenommen wird. In Stichworten lässt sich die unterschiedliche Mechanisierung dieser Modellverfahrenskette wie folgt beschreiben.

Pfad 2: Holzernte Selbstwerber (inkl. Rücken, Länge 1 m) → Transport (Traktor und Anhänger inkl. Beladen und Abladen mit Kran) → Spalten (großer Senkrechtspalter) → Stapeln (inkl. Lagerung) → Sägen (Brennholzkreissäge auf 33 cm) → Beladen → 5 km Transport zum Kunden → Abladen (Kippen)

Pfad 3: "Waldbauer 2, höher mechanisiert". Bei dieser Prozesskette beginnt der Rationalisierungsprozess bereits bei der Holzernte, bei der die Rohholzsortimente 2 bis 5 m lang sind und auch mit Seilzugunterstützung gerückt werden. Auch hier ist der Akteur meist ein Landwirt mit eigenem Wald oder ein kleingewerblicher Brennholzhändler, der als Selbstwerber im fremden Wald auftritt. Der Transport erfolgt mit Traktor und Anhänger zum Aufarbeitungsplatz auf dem Hofgelände. Im Unterschied zu Pfad 2 ist aber kein Ablängen mit Motor- oder Kreissäge erforderlich, da das Aufarbeiten mit einer kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine durchgeführt wird. Bei der Lagerung werden die Kurzscheite in Boxen geschüttet. Der Transport zum Kunden wird wieder mit traktorgezogenen Anhängern durchgeführt, wobei eine mittlere Entfernung von 10 km (asphaltierte Straße) angenommen wird. Die Modellverfahrenskette "Pfad 3" ist nachfolgend in Stichworten zusammengefasst.

Pfad 3: Holzernte Selbstwerber (inkl. Rücken, Länge 2 bis 5 m) → Transport (Traktor und Anhänger inkl. Beladen und Abladen mit Kran) → Beladen der Spaltmaschine → Bearbeiten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine → Lagerung → Beladen → 10 km Transport zum Kunden inkl. Abladen (Kippen)

Pfad 4: "professionelles Scheitholzgewerbe": Bei einer Jahresproduktion von deutlich über 200 Rm wird Scheitholz auf professionell betriebenen sogenannten "Biomassehöfen" produziert und verkauft. In dieser hochmechanisierten Produktionskette wird für die Holzernte ein Harvester eingesetzt, wobei für die Scheitholzproduktion das als Papierholz oder Industrieholz sortierte Holz, d. h. Holz minderer Qualität, verwendet wird. Das Holz wird mit Rundholz-LKW zum Bearbeitungsplatz transportiert, dann je nach Sortiment mit verschiedenen Maschinen (in diesem Fall eine große kombinierte Sägespaltmaschine) verarbeitet und in Gitterboxen oder auf großen Haufenlagern geschüttet gelagert. Der Transport zum Kunden findet mit LKW statt, wobei eine mittlere Entfernung von 15 km (asphaltierte Straße) angenommen wird. In Stichworten lässt sich diese Modellverfahrenskette wie folgt beschreiben.

Pfad 4: Holzernte professionell (Länge 5 – 8 m) → Transport (Langholztransport) → Beladen der Maschine (Greifzange) → Bearbeiten mit der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine → Lagerung → Beladen → 15 km Transport zum Kunden inkl. Abladen (Kippen)

Aus den Arbeitszeiten in Tab. 36 (Kapitel 5.9.4) und den unterstellten Maschinenauslastungen in Tab. 40 (Kapitel 5.9.6.1) ergibt sich rechnerisch in den Prozessketten die folgende jährliche theoretische Gesamtproduktion für die eingesetzten Scheitholzaufbereitungsmaschinen, durch welche die Prozesskette hier zusätzlich charakterisiert werden soll:

- Pfad 1: 97 Rm (33-er Scheite, gestapelt)
- Pfad 2: 131 Rm (33-er Scheite, gestapelt)
- Pfad 3: 658 Rm (33-er Scheite, gestapelt)
- Pfad 4: 3511 Rm (33-er Scheite, gestapelt)

Dabei muss diese Gesamtproduktion nicht notwendigerweise in einem einzigen Betrieb stattfinden, sondern kann – vor allem bei den Pfaden 1 bis 3 – auch durch überbetrieblichen Maschineneinsatz von verschiedenen Maschinennutzern erwirtschaftet werden.

5.9.3 Arbeitszeitbedarf in den Prozessketten

Der aggregierte spezifische Arbeitszeitbedarf wurde für jede der in Kapitel 5.9.2 vorgestellten Prozessketten einheitlich berechnet auf einen Festmeter Holz, der zu 33 cm langen Scheiten aufgearbeitet und – außer beim Freizeit-Selbstwerber (Pfad 1) – ofenfertig zum Kunden ausgeliefert wird. Tab. 36 zeigt die Ergebnisse dieser Aggregation und visualisiert zugleich die einzelnen Verfahrenselemente, aus der sich die jeweilige Prozesskette zusammensetzt. Die Daten für Holzernte, Ablängen, Spalten und Schichten wurden aus den jeweiligen Durchschnittsangaben der Arbeitszeitmessungen in Kapitel 5.1 entnommen. Die übrigen Zeiten für Laden, Abladen, Transport und Beschicken stammen aus Nebenrechnungen bzw. aus Literaturangaben.

Bei den Transporten mit landwirtschaftlichen Fahrzeugen wurde eine mittlere Fahrgeschwindigkeit von 25 und 15 km/h bei Straßen- bzw. Feldwegfahrten angenommen, der PKW-Transport erfolgt mit durchschnittlich 40 km/h. Bei LKW-Transporten wurde eine Fahrgeschwindigkeit unterstellt, die auf Planungsdaten des Bundesverbandes Deutschen Güternahverkehrs e.V. (BDN) zurückgehen, wobei hier aus den Angaben eine entfernungsabhängige Geschwindigkeitsformel abgeleitet wurde; sie gilt für den Entfernungsbereich bis 50 km und wird bei BDN [12] beschrieben. Für die hier unterstellten 15 km beträgt die solchermaßen errechnete mittlere Geschwindigkeit 32 km/h.

Bei der Abschätzung der je Transportmittel transportierten Frachten wurden die Volumina der Anhänger, die bei den durchgeführten Zeitstudien verwendet wurden, zugrunde gelegt. Dies war bei dem PKW-Anhänger ein Ladevolumen von 5,4 m³ und beim Traktor-Anhänger 10 m³, die auf das Ladevolumen von ungespaltenen Meterrundlingen umgerechnet wurden (3,32 Fm bzw. 6,42 Fm). Beim LKW wurde eine typische Lademenge von 10 Fm angenommen. Der Zeitbedarf für das Laden von Hand entstammt der Zeitstudie für das Beladen einer Bündelhilfe mit Meterholz-Rundlingen und betrug 3,3 Fm/AKh. Für das Abladen beim Kunden wurde ein rasches Abkippen unterstellt, wobei der Zeitbedarf hierfür auf 0,07 Stunden festgesetzt wurde, so dass sich je

nach Ladevolumen die hieraus unterschiedliche Teilverfahrenskosten ergeben. Beim Zeitbedarf für das Laden mit Kran wurde dagegen auf Zeitstudien nach PAUSCH [50] zurückgegriffen, demnach liegt die Leistung für das Beladen mit Kran bei 60 Fm/h und für das Entladen bei 83 Fm/h.

Die in Tab. 36 dargestellte Summe der Teilarbeitszeiten zeigt, dass die Bandbreite des spezifischen Arbeitszeitbedarfs zwischen von 5,7 Stunden je Festmeter Kurzholz (Pfad 1) und 0,49 h/Fm (Pfad 4) liegt. Eine arbeitswirtschaftliche Verbesserung durch eine zunehmende Mechanisierung wird besonders beim Wechsel von Pfad 2 (Waldbauer 1, gering mechanisiert) auf Pfad 3 (Waldbauer 2, höher mechanisiert) sichtbar. Hier reduziert sich der Zeitbedarf der gesamten Prozesskette deutlich von 4,2 Stunden je Festmeter Brennholz (Pfad 2) auf nur noch 1,27 h/Fm (Tab. 36). Dabei wirkt sich vor allem die effizientere Holzerntetechnik durch das Aushalten längerer Rundhölzer und Verwendung einer Seilwinde sowie der Einsatz einer kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine bei der Scheitholzaufbereitung positiv, d.h. zeitmindernd, aus.

Tab. 36: Durchschnittlicher spezifischer Zeitbedarf je Festmeter Scheitholz (hier: als 33 cm Scheite) in den einzelnen Prozessketten (Zeitangaben als reine Arbeitszeit, RAZ, vgl. Kapitel 4.1)

Verfahrensschritt	Pfad 1 Freizeit- Selbstwerber (h/Fm)	Pfad 2 Waldbauer 1, gering me- chanisiert (h/Fm)	Pfad 3 Waldbauer 2, höher mechani- siert (h/Fm)	Pfad 4 Professionelles Scheitholzge- werbe (h/Fm)
Holzernte + Rücken (Selbstwerber, 1 m)	1,79	1,79	-	-
Holzernte + Rücken Traktor/Seilwinde	-	-	0,70	-
Holzernte (Jungdurchforstung, Harvester)	-	-	-	0,10
Holzernte Rücken (Jungdurchforst., Forwarder)	-	-	-	0,10
Laden (33 cm von Hand, geschüttet, lose)	-	-	-	-
Laden (33 cm maschinell, geschüttet, lose)	-	-	0,01	0,01
Laden (1 m ungespalten, von Hand)	0,30	0,30	-	-
Laden (mit Kran)	-	-	0,02	0,02
Transport (PKW + Anhänger)	0,02	-	-	-
Transport 1 (Traktor + Anhänger)	-	0,02	0,02	-
Transport 2 zum Kunden (Traktor + Anhänger)	-	0,04	0,08	-
Transport 1 Verarbeitungsplatz (LKW)	-	-	-	0,01
Transport 2 zum Kunden (LKW)	-	-	-	0,05
Abladen 1 (kippen)	0,01	0,01	0,01	0,01
Abladen 2 beim Kunden	-	0,01	-	-
Abladen (Kran)	-	-	0,01	0,01
Ablängen Kreissäge (auf 33 cm)	0,63	0,63	-	-
Spalter klein	2,33	-	-	-
Spalter groß	-	0,67	-	-
Beschicken maschinell (mit Kran)	-	-	0,02	-
Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	0,40	-
Große kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	-	0,17
Schichten (33 cm gespalten)	0,63	0,63	-	-
Summe Zeitbedarf (h/Fm):	5,70	4,24	1,27	0,49
Zum Vergleich: Zeitbedarf in h/Rm (33 cm Scheite, gestapelt) ^a :	3,59	2,67	0,80	0,31

^a Zu den verwendeten Faktoren für die Umrechnung von Festmeter zu 33-er Scheiten (gestapelt) siehe Kapitel 5.8.1

Über die in Kapitel 5.8.1 genannten Volumen-Umrechnungsfaktoren errechnet sich die Angabe der Arbeitszeitsumme für einen Raummeter ofenfertige Kurzscheite (33 cm). Er beträgt demnach zwischen 3,59 und 0,31 h/Rm (Tab. 36). Inwieweit sich dieser unterschiedliche Arbeitszeitaufwand in den Gesamtkosten niederschlägt, hängt allerdings von dem Wert bzw. den Kosten einer Arbeitskraftstunde ab. Entsprechende Kostenbetrachtungen finden sich in Kapitel 5.9.6.

Bei der Betrachtung der Zeitanteile, die in Abb. 104 für die einzelnen Phasen der Bereitstellungs-kette zusammengestellt sind, wird ersichtlich, dass die Aufbereitung beim Wechsel zum höher mechanisierten Verfahren anteilig tendenziell zurückgeht, nur beim Selbstwerber nimmt sie den größten Zeitanteil in Anspruch. Bei einer besonders effizienten Produktion wie in Pfad 4 weisen die beiden Phasen "Holzernte" und "Aufbereiten" ungefähr gleiche Zeitanteile auf (ca. 40%), den

Rest teilen sich die Transporte und das Laden mit jeweils ca. 10%. Verschieben sich diese Anteile deutlich, so weist dies auch auf größere Rationalisierungsreserven in einem Teilverfahren hin. Im Pfad 3 liegen diese Reserven beispielsweise bei der Holzernte, die einen 56%-igen Anteil einnimmt, oder beim Pfad 2 erweist sich das Laden mit 26% Anteil als besonders zeitraubend, und beim Pfad 1 ist es das Aufbereiten (52%). Der von Pfad 1 bis 4 ansteigende Anteil der Transporte von 0,3% auf 11% zeigt dagegen den steigenden Logistikaufwand für die Bewältigung des zunehmenden Umsatzes von Scheitholz und für den größeren Wirkungsradius beim Vertrieb.

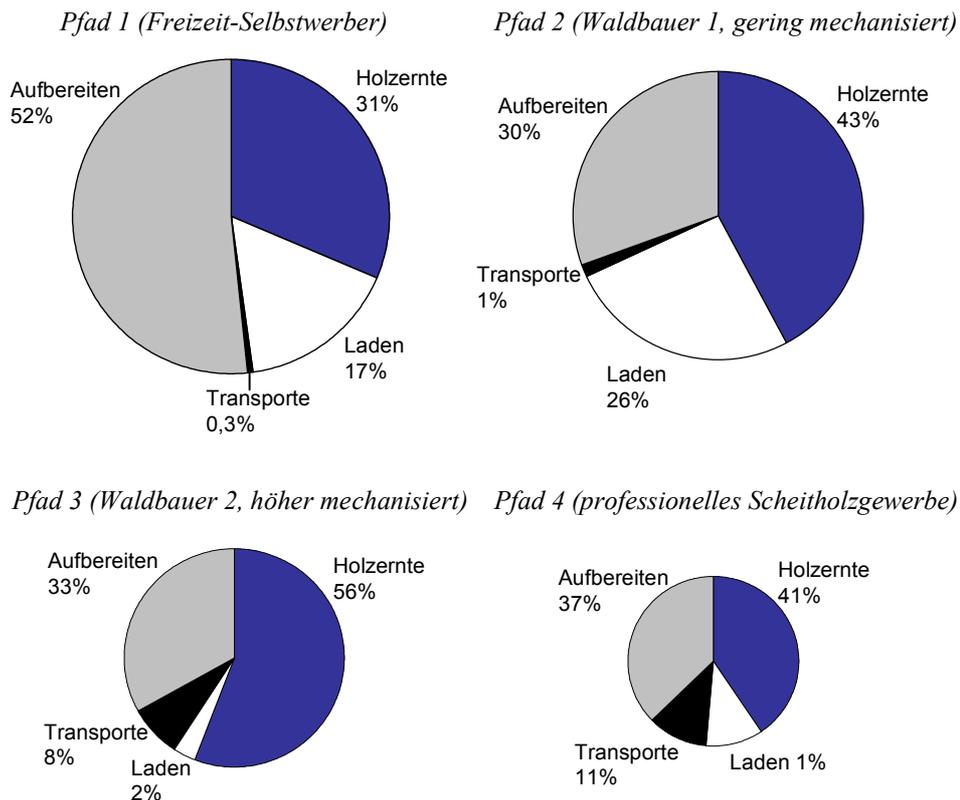


Abb. 104: *Arbeitszeitanteile verschiedener Phasen der Scheitholzbereitstellung, dargestellt für die vier ausgewählten Modellverfahrensketten. Holzernte: Holzernte mit Rücken. Transporte: Hin- und Rück Wald-Bearbeitungsplatz-Kunde. Laden: Be- und Entladen und Aufschichten. Aufbereiten: Ablängen, Spalten, Beschicken*

5.9.4 Arbeitsschwere in den Prozessketten

Bei der Aggregation der Arbeitsschwere wurden die nach der OWAS-Methode bestimmten Belastungsindizes der Verfahrenselemente (vgl. Kapitel 5.2.2) gemäß ihres spezifischen Zeitanteils zur Verarbeitung eines Festmeters gewichtet, um die Belastung ganzer Pfade unterscheiden und vergleichen zu können. Bei dieser Gewichtung wurden als Zeitanteile die in Kapitel 5.9.3 (Tab. 36) dargestellten Teilverfahrens-Arbeitszeiten verrechnet.

Die so ermittelten OWAS-Summenwerte sind in Tab. 37 dargestellt. Sie zeigen eine Spannweite von 168 bis 106, d. h. von einer „eher belastenden“ Arbeit (vgl. Bewertung OWAS 5.2.5) bis zu einer „kaum belastenden“ Arbeit. Hierbei ist zu erwähnen, dass die OWAS-Werte für ausschließ-

lich sitzend durchgeführte Abschnitte innerhalb der Prozesskette (wie z. B. die Transporte oder die Holzernte mit dem Harvester und das maschinelle Be- und Entladen bzw. das Beschicken der Verarbeitungsmaschinen) hier nicht eigens gemessen worden waren; sie konnten statt dessen auf den OWAS-Wert 100 festgesetzt werden, da dieser den niedrigsten Wert für den Index nach OWAS darstellt und den sitzenden Tätigkeiten entspricht.

Die Ergebnisse in Tab. 37 zeigen, dass – kaum überraschend – die Arbeiten der Modellverfahrenskette 4 ("professionelles Scheitholzgewerbe") als am wenigsten belastend anzusehen sind, zumal hier auch die höchste Mechanisierungsstufe vorliegt. Wie in Kapitel 5.9.3 gezeigt, ist hier aber zugleich auch die Arbeitsproduktivität am höchsten, das bedeutet, dass der Scheitholzausstoß je Arbeitskraftstunde (AKh) am größten ist und somit auch die Belastung je produzierter Einheit Scheitholz günstig ist. Letzteres stellt allerdings eine Angabe dar, die sich hier nicht sinnvoll in Form einer Vergleichszahl errechnen lässt. Vielmehr sind die Angaben in Tab. 37 als eine Arbeitsplatzcharakterisierung zu interpretieren, die unabhängig von der Arbeitsproduktivität optimiert werden sollte.

Die Ergebnisse in Tab. 37 weisen einen bemerkenswerten – wenn auch geringen – Anstieg der Arbeitsschwere von Pfad 1 (Freizeit-Selbstwerber) zu Pfad 2 (Waldbauer 1, wenig mechanisiert) aus, zumal in Pfad 2 eine höhere Mechanisierung vorliegt. Dies lässt sich durch die Tatsache erklären, dass die eher wenig belastenden Arbeiten am großen Spalter deutlich schneller ablaufen, wodurch sich der prozentuale Anteil der übrigen zum Teil schwereren Arbeiten der Prozesskette erhöht, so dass diese rechnerisch stärker gewichtet werden müssen. Für eine Gesamtbeurteilung der Arbeiten in einer Prozesskette erscheint dieses rechnerische Vorgehen dennoch angemessen, denn aus Sicht der arbeitenden Person ist die Arbeitsweise des Freizeit-Selbstwerbers im Vergleich zum Waldbauern 1 insgesamt vorzuziehen. Aus Sicht des Unternehmers verhält es sich dagegen umgekehrt, weil beim Waldbauern 1 die Produktivität gegenüber dem Freizeit-Selbstwerber erhöht ist (vgl. Tab. 36).

Tab. 37: Arbeitsbelastung in den einzelnen Prozessketten (OWAS-Faktor nach Lundqvist)

Verfahrensschritt	Pfad 1 Freizeit- Selbstwerber	Pfad 2 Waldbauer 1, gering me- chanisiert	Pfad 3 Waldbauer 2, höher mecha- nisiert	Pfad 4 Professionel- les Scheit- holzgewerbe
Holzernte + Rücken (Selbstwerber, 1 m)	186	186	-	-
Holzernte + Rücken Traktor/Seilwinde	-	-	170	-
Holzernte (Jungdurchforstung, Harvester)	-	-	-	100
Holzernte Rücken (Jungdurchforst., Forwarder)	-	-	-	100
Laden (33 cm von Hand, geschüttet, lose)	-	171	-	-
Laden (33 cm maschinell, geschüttet, lose)	-	-	100	100
Laden (1 m ungespalten, von Hand)	171	171	-	-
Laden (mit Kran)	-	-	100	100
Transport (PKW + Anhänger)	100	-	-	-
Transport 1 (Traktor + Anhänger)	-	100	100	-
Transport 2 zum Kunden (Traktor + Anhänger)	-	100	100	-
Transport 1 Verarbeitungsplatz (LKW)	-	-	-	100
Transport 2 zum Kunden (LKW)	-	-	-	100
Abladen 1 (kippen)	100	100	100	100
Abladen 2 Kunde	-	100	-	-
Abladen (Kran)	-	-	100	100
Ablängen Kreissäge (auf 33 cm)	145	145	-	-
Spalter klein	142	-	-	-
Spalter groß	-	142	-	-
Beschicken maschinell (mit Kran)	-	-	100	100
Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	109	-
Große kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	-	118
Schichten (33 cm gespalten)	171	171	-	-
Nach Zeitanteilen gewichteter Durchschnitt:	161	168	142	106

5.9.5 Spezifischer Energieaufwand in den Prozessketten

Der spezifische Energieaufwand ist die auf die produzierte Holzmenge bezogene Endenergiemenge (Kraftstoff oder Strom). Er wurde in den Praxismessungen für die meisten Verfahrensschritte der Aufbereitung direkt vor Ort bestimmt (vgl. Kapitel 5.3). Für einige zusätzliche Verfahrensschritte wurde der Energieaufwand – um ihn elektrisch angeben zu können und somit vergleichbar mit den übrigen Teilverfahren der Aufbereitung zu machen – auf Basis von Maschinenkennwerten und den Kennwerten der anderen gemessenen Maschinen, wie der Kreissäge und des Senkrechspalters, berechnet. Dazu wurde der je Zeiteinheit berechnete oder angegebene Verbrauch in einen spezifischen Energieverbrauchswert im Vergleich zum möglichen Maximalwert umgerechnet. Dieses Vorgehen betrifft im Einzelnen die Teilverfahren für die kombinierten Säge-Spaltmaschinen (vgl. Kapitel 5.3.6).

In Tab. 38 sind die einzelnen Energieaufwendungen aufgelistet und zu einem Summenwert für die ganze Prozesskette aufaddiert. Demzufolge wendet der Freizeit-Selbstwerber (Pfad 1) für die gesamte Bereitstellung besonders wenig Energie je Festmeter offenfertiges Scheitholz auf. Sein aggregierter Verbrauchswert liegt mit 8,9 kWh/Fm erwartungsgemäß am niedrigsten, er könnte

durch Verwendung einer Axt anstelle des kleinen Senkrechtpalters sogar noch weiter abgesenkt werden.

Auf Grund der steigenden Transportaufwendungen und des höheren Mechanisierungsgrades steigt der Energieaufwand in den drei übrigen Prozessketten auf 12,5 kWh/Fm (Pfad 2), 22,5 kWh/Fm (Pfad 3) auf 47,4 kWh/Fm (Pfad 4) und liegt damit bei mehr als dem Fünffachen des Freizeit-Selbstwerbers. Die Unterschiede beim Transportenergieaufwand resultieren zusätzlich aus der unterschiedlichen Ladekapazität eines Traktorengespans im Vergleich zu einem LKW oder einem PKW mit Anhänger.

Tab. 38: *Der spezifische Energieaufwand in den einzelnen Prozessketten. Endenergieträger in Klammern: k Kraftstoff, el elektrischer Strom*

Verfahrensschritt	Pfad 1 Freizeit- Selbstwerber (kWh/Fm)	Pfad 2 Waldbauer 1, gering mechanisiert (kWh/Fm)	Pfad 3 Waldbauer 2, höher mechanisiert (kWh/Fm)	Pfad 4 Professionelles Scheitholzge- werbe (kWh/Fm)
Holzernte + Rücken (Selbstwerber, 1 m)	3,0 (k)	3,0 (k)	-	-
Holzernte + Rücken Traktor/Seilwinde	-	-	6,3 (k)	-
Holzernte (Jungdurchforstung, Harvester)	-	-	-	11,8 (k)
Holzernte Rücken (Jungdurchforst., Forwarder)	-	-	-	5,5 (k)
Laden (33 cm, von Hand, geschüttet, lose)	-	0,0	-	-
Laden (33 cm, maschinell, geschüttet, lose)	-	-	0,7 (k)	0,7 (k)
Laden (1 m ungespalten, von Hand)	0,0	0,0	-	-
Laden (mit Kran)	-	-	0,9 (k)	0,9 (k)
Transport (PKW + Anhänger)	3,2 (k)	-	-	-
Transport 1 (Traktor + Anhänger)	-	2,5 (k)	2,5 (k)	-
Transport 2 zum Kunden (Traktor + Anhänger)	-	4,6 (k)	9,2 (k)	-
Transport 1 Verarbeitungsplatz (LKW)	-	-	-	3,6 (k)
Transport 2 zum Kunden (LKW)	-	-	-	21,0 (k)
Abladen 1 (kippen)	0,6 (k)	0,6 (k)	0,6 (k)	0,6 (k)
Abladen 2 beim Kunden	-	0,6 (k)	-	-
Abladen (Kran)	-	-	0,7 (k)	0,7 (k)
Ablängen Kreissäge (auf 33 cm)	0,7 (el)	0,7 (el)	-	-
Spalter klein	1,5 (el)	-	-	-
Spalter groß	-	0,6 (el)	-	-
Beschicken maschinell (mit Kran)	-	-	0,9 (k)	0,9 (k)
Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	0,8 (el)	-
Große kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	-	1,7 (el)
Schichten (33 cm gespalten)	0,0	0,0	-	-
Summe Energiebedarf (kWh/Fm):	8,9	12,5	22,5	47,4
Verteilung Strombedarf / Kraftstoff (%)	32 / 68	12 / 88	4 / 96	4 / 96

Bei der Betrachtung der Verteilung der in den Prozessketten aufgewendeten Endenergieträger (Tab. 38) fällt auf, dass der Anteil der elektrischen Energie im Vergleich zu den Kraftstoffen mit zunehmendem Grad der Mechanisierung von 32% auf 4% abnimmt, wohingegen die Summe des Energiebedarfs von 8,9 kWh/Fm bei Pfad 1 auf 47,4 kWh/Fm bei Pfad 4 steigt. Beides ist unter

anderem die Folge des zunehmenden Transportaufwandes, wobei bei Pfad 4 noch die Energiekosten für den Einsatz eines Harvesters und Forwarders bei der Holzernte ins Gewicht fallen.

Eine Auswertung des anteiligen Energieverbrauchs in den einzelnen Phasen der Prozesskette zeigt, dass der Anteil für das eigentliche Aufbereiten von Pfad 1 mit 24% bei bis zu Pfad 4 auf nur noch 5% überraschend deutlich absinkt (Abb. 105). Bei allen Verfahren haben verursacht die Transporte den größten Energieverbrauchsanteil, hier liegen damit auch die größten Einsparpotentiale.

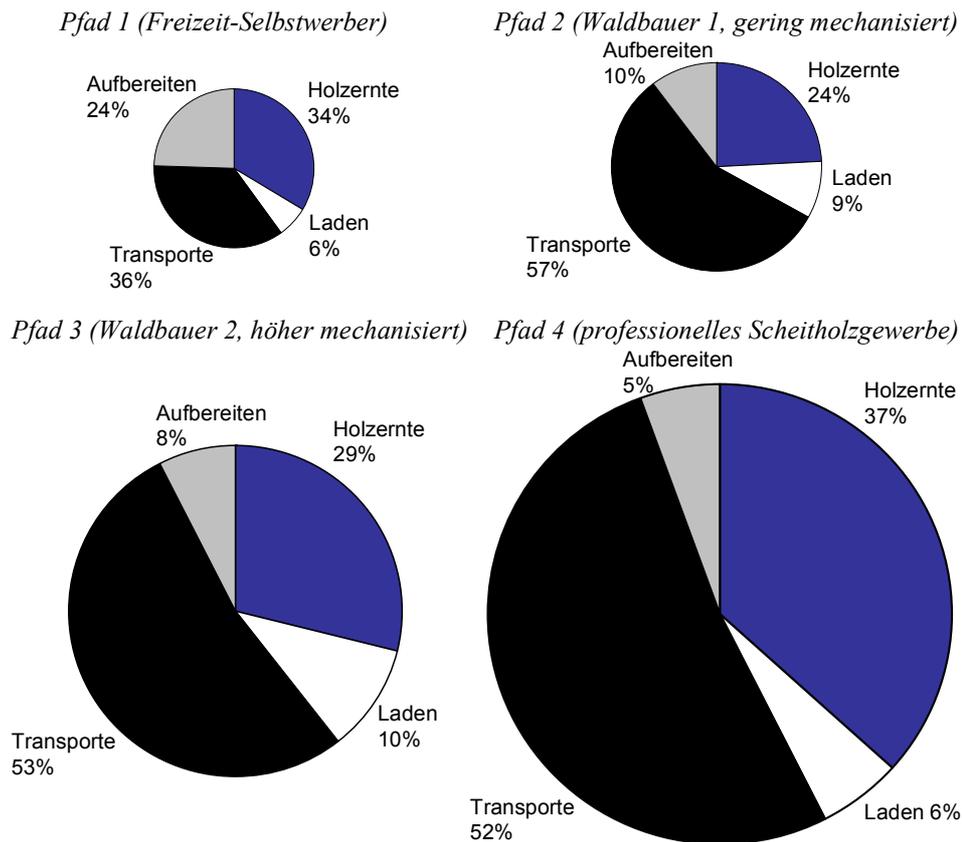


Abb. 105: *Energieverbrauchsanteile verschiedener Phasen der Scheitholzbereitstellung, dargestellt für die vier ausgewählten Modellverfahrensketten. Holzernte: Holzernnte und Rücken. Transporte: Hin- und Zurück Wald-Bearbeitungsplatz-Kunde. Laden: Be- und Entladen und Aufschichten des Holzes. Aufbereiten: Ablängen, Spalten, Beschicken*

Die hohen Anteile der Transportenergie am Endenergieverbrauch weisen auch darauf hin, dass die Bereitstellungskette für Scheitholz insgesamt einen energetisch relativ extensiven Prozess darstellt, zumal – im Vergleich zur Holzhackschnitzel- oder Pelletbereitstellung – nur ein geringer Zerkleinerungsgrad notwendig ist und auch eine energieintensive Trocknung oder Kühlung sowie die mechanische Förderung hier weitgehend entfallen. Dies wird besonders deutlich beim Vergleich der Summe der Endenergieaufwendungen aus Tab. 38 im Verhältnis zur Energiemenge in einem Festmeter Scheitholz. Je Festmeter lufttrockenem Buchenholz sind hier ca. 3040 kWh anzusetzen, bei Fichtenholz wären es ca. 1833 kWh. Somit errechnet sich beispielsweise Buchenholz in Pfad 1 ein Input-Outputverhältnis der Endenergeträger von 0,0029 (Tab. 39). Das heißt,

dass nur ca. 0,3% der Scheitholzenergiemenge als Endenergieträger investiert werden muss. Beim energieintensiveren Pfad 4 sind es dagegen ca. 1,6% (Buche) bzw. ca. 2,6% (Fichte) des Energieertrags, der in Form von Endenergieträgern aufgewendet werden muss.

Um eine energiewirtschaftliche Vergleichbarkeit des Energieverbrauchs zu erreichen, muss der Strom- und Kraftstoffverbrauch mit Hilfe eines Faktors für den kumulierten Energieverbrauch (KEV) verrechnet werden. Für den Kraftwerksmix in Deutschland gilt hier der Faktor 2,9 [48], das bedeutet, dass je Kilowattstunde Strom, die beim Endverbraucher eingesetzt wird, in der Vorkette bereits 2,9 kWh Primärenergie für die Gewinnung und Verteilung (inkl. Leitungsverluste) aufgewendet wurden. Für Dieselkraftstoff wird ein entsprechender Primärenergiefaktor von 1,15 angegeben [48].

Tab. 39 zeigt das Ergebnis der Berechnungen, bei denen diese primärenergetischen Faktoren berücksichtigt wurden, wobei hier vereinfachend die maschinengebundenen Energieaufwendungen sowie die für die Herstellung der Betriebsstoffe (z. B. Hydrauliköl, Sägekettenöl) benötigte Primärenergie vernachlässigt wurde. Die Ergebnisse zeigen, dass auch unter energiewirtschaftlichen Berechnungsannahmen von einer besonders günstigen Energiebilanz bei der Scheitholzbereitstellung auszugehen ist, da der Primärenergieaufwand bei nur 0,5 bis 3,2% der bereitgestellten Scheitholzenergie liegt. Damit zählt die Scheitholzproduktion unter den Bereitstellungsverfahren für Bioenergieträger zu den Prozessketten mit besonders niedrigen spezifischen Energieaufwendungen (vgl. [47]).

Tab. 39: *Energiebilanz der Scheitholzbereitstellung. Hier nur Berechnungen für den Energieverbrauch in der Prozesskette (ohne Maschinenherstellung und Betriebsstoffe)*

	Energiebedarf der Prozesskette (vgl. Tab. 38)		Bilanz Input/Output, endenergiebezogen		Bilanz Input/Output primärenergiebezogen ^a	
	Endenergie kWh/Fm	davon Strom/ Kraftstoff (%)	Buche ^b	Fichte ^b	Buche ^b	Fichte ^b
Pfad 1	8,9	32 / 68	0,0029	0,0049	0,0050	0,0083
Pfad 2	12	12 / 88	0,0039	0,0065	0,0054	0,0089
Pfad 3	22,5	4 / 96	0,0074	0,0123	0,0090	0,0150
Pfad 4	47,4	4 / 96	0,0156	0,0259	0,0190	0,0315

^a Primärenergiefaktoren: elektrischer Strom 2,9; Kraftstoffe (einheitlich für Diesel und Benzin): 1,15 (d.h. kWh Primärenergieaufwand je kWh Strom- bzw. Kraftstoffverbrauch)

^b Energiemenge je Festmeter Scheitholz bei 15% Wassergehalt: Buche 3040 kWh, Fichte 1833 kWh

5.9.6 Bereitstellungskosten in den Prozessketten

Die Gesamtkosten der Scheitholzbereitstellung werden hier für die vier Prozessketten jeweils aus den drei Kostengruppen "Maschinenkosten", "Energiekosten" und "Lohnkosten" berechnet. Das Vorgehen und die Ergebnisse hierzu werden nachfolgend vorgestellt.

5.9.6.1 Maschinenkostenberechnung

Generelles Vorgehen. Um eine annähernde Vergleichbarkeit der Maschinenkosten zu gewährleisten, sind – soweit dies geboten erscheint – möglichst einheitliche Basisdaten und Grund-

annahmen zu treffen. Daher ist die direkte Übernahme von Kostenangaben aus der Literatur oftmals nicht ohne Weiteres möglich, sondern bedarf gegebenenfalls einer weiteren Anpassungsrechnung, durch welche beispielsweise ein einheitliches Zinsniveau oder ein einheitliches Kostenrechnungsverfahren sichergestellt werden. Auch im vorliegenden Fall konnte meist nicht auf Standardsätze zurückgegriffen werden, so dass zum Teil eigene Berechnungen angestellt werden mussten, zumal vereinzelte Kostenangaben in anderen Quellen nicht mit den hier getroffenen Basisannahmen vergleichbar waren. Im Einzelnen wurden daher spezielle Kostenrechnungen für den kleinen und großen Senkrechtspalter, die kombinierte Säge-Spaltmaschine, die Kreissäge und die Motorsäge durchgeführt.

Investitionskostenrechnung. Die Berechnung der Investitionskosten erfolgt nach der Annuitätenmethode, mit der die am Anfang der Lebensdauer stehenden Investitionen auf die einzelnen Jahre der Nutzungsdauer umgelegt werden. Dies erfolgt durch Multiplikation der Investitionssumme mit dem Annuitätenfaktor a , der sich aus nachfolgender Gleichung ergibt, wobei i der kalkulatorische Zinssatz und T die kalkulatorische Betrachtungsdauer darstellen.

$$a = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1}$$

Der errechnete periodisch konstante Betrag wird als Annuität bezeichnet, der als Zins und Tilgung für rückzahlendes Kapital in Höhe des Kapitalwertes aufzufassen ist. Diese Berechnungsmethode ermöglicht es, alle Zahlungen nach der Ermittlung der jeweiligen Annuität aufzusummieren, um damit die durchschnittlichen jährlichen Kosten zu ermitteln.

Einheitlich wird hier ein Zinsfuß von 6% unterstellt. Dieser Zinsfuß berücksichtigt einen hohen Anteil Fremdkapital bei der Finanzierung der jeweiligen Investitionsgüter und liegt daher deutlich über dem durchschnittlichen Betrag der jährlichen Preissteigerungsrate. Bei der Kalkulation wurden die in Tab. 40 genannten Annahmen und Verrechnungspauschalen angewendet.

Reparaturkosten. Nach einer beim KTBL üblichen Methode [36] werden die Reparaturkosten ermittelt. Dabei wird zunächst die Reparaturkostensumme (R_t) über die gesamte Lebensdauer bestimmt. In den vorliegenden Berechnungen werden einheitlich 80% des Anschaffungspreises unterstellt. Dieser Wert nimmt eine Zwischenstellung zwischen landwirtschaftlichen Maschinen (z. B. 6-reihiger Zuckerrüben-Vollernter mit 63%, vgl. [59]) und forstlichen Maschinen z. B. kombinierte Säge-Spaltmaschine Kretzer Herkules II mit 100% [45] ein. Die jährlichen Reparaturkosten (R_a) errechnen sich dann nach der Formel

$$R_a = R_t / n^{1,5} \times L^{1,5} / N_{kalk}$$

wobei n die zugrunde gelegte Lebensdauer in Stunden darstellt, L ist die für den Praxisfall erwartete Gesamtnutzungsdauer in Stunden und N_{kalk} ist die Nutzungsdauer in Jahren, wobei diese Nutzungsdauer sich bei hoher Auslastung verkürzen kann. Durch den Exponent 1,5 wird sichergestellt, dass die Reparaturkosten mit zunehmender Benutzung ansteigen. Bei der Verwendung der o.g. Berechnungsformel bleiben die Reparaturkosten mit der Veränderung der jährlichen Auslastung variabel, das heißt, sie sinken, wenn die tatsächliche Lebensdauer unterhalb von L liegt.

Weitere Kostenansätze. Neben den Investitions- und Reparaturkosten wurden weitere pauschale Kostenansätze für Maschinenunterbringung, Versicherung, Geschäftskosten sowie Betriebssteuern und -lasten festgelegt, sie entsprechen den bei Maschinenkostenberechnungen allgemein üblich Annahmen (vgl. z. B. [59]). Kosten für den Arbeitsaufwand der Maschinenwartung werden hier vereinfachend nicht in Anrechnung gebracht. Die pauschalen Annahmen für die Berechnungen sind in Tab. 40 zusammengestellt.

Für den Schmierstoff- und Hydraulikölverbrauch wurde bei den Spaltern bzw. Sägespaltmaschinen ein pauschaler Ansatz von 20% der Stromkosten angenommen. Bei der Motorsäge liegt die Annahme für den Verbrauch an Verlustschmierstoff (Kettenöl) bei 1,3 Liter je Maschinenarbeitsstunde. Energie- und Lohnkosten werden hier nicht angesetzt sondern kommen in separaten Berechnungen zum Ansatz (vgl. Kapitel 5.9.6.2 und 5.9.6.3).

Tab. 40: Berechnung der Maschinenkosten ohne Energiekosten und Lohnanspruch (durch Auf- oder Abrundung der Einzelwerte sind minimale Abweichungen bei der Summenbildung möglich)

Annahme / Kostenposition	Senkrechtspalter, klein	Senkrechtspalter, groß	kleine kombinierte Sägespaltmaschine	große kombinierte Sägespaltmaschine	Motorsäge	Kreissäge
<i>Variable Einflussgrößen</i>						
Anschaffungspreis A (inkl. MwSt.)	2.000	3.500	9.500	150.000	700	1.000
Nutzungsdauer nach Jahren (a)	10	10	10	10	6	10
Nutzungsdauer nach Stunden (Abschreibungsschwelle) (h)	10.000	10.000	10.000	10.000	5.000	1.0000
Jahresauslastung (h)	350	350	500	1000	400	350
Lebensdauer bei o.g. Auslastung (a)	28,6	28,6	20,0	10,0	12,5	28,6
hier unterstellte Lebensdauer (a)	10	10	10	10	6	10
Reparaturkostensumme für ges. Nutzungsdauer (% von A)	80	80	80	80	80	80
Kosten für Unterbringung (% von A)	0,5	0,5	0,5	0,5	–	0,5
jährl. Versicherungskosten (% von A)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
jährl. Geschäftskosten (% v. A)	3	3	3	3	3	3
jährl. Betriebssteuer u. Lasten (% v. A)	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
<i>Kostenzusammenstellung (€/a):</i>						
Annuität (Anschaffung pro Jahr)	272	476	1291	20.380	95	136
Kosten der Unterbringung	10	18	48	750	0	5
Versicherung	10	18	48	750	3,5	5
allgemeine Geschäftskosten	60	105	285	4500	21	30
Betriebssteuern und Lasten	10	18	48	750	4	5
Summe jährliche Festkosten/a	362	633	1718	27.130	123	181
Reparaturkosten	33	58	269	12.000	31	17
Schmierstoff/Hydraulikölkosten	8	12	38	400	52	0
<i>Summe jährliche variable Kosten</i>	<i>41</i>	<i>70</i>	<i>306</i>	<i>12.400</i>	<i>91</i>	<i>17</i>
Gesamtmaschinenkosten (€/a)	403	703	2.024	39.530	214	197
Gesamtmaschinenkosten (€/h)	1,15	2,01	4,05	39,53	0,54	0,56

5.9.6.2 Spezifische Energiekosten der Prozessketten

Die Daten zum spezifischen Energiebedarf wurden mit Energieträgerpreisen von 0,20 €/kWh (Strom) bzw. 1,05 €/l (Dieselkraftstoff) verrechnet und ergeben so die spezifischen Energiekosten, die in Tab. 41 für die relevanten Verfahrensschritte der jeweiligen Prozesskette zusammengestellt sind. Für Motorsägen wurden Kraftstoffkosten von 1,40 € angesetzt. Dieser Preis ergibt sich aus den Kosten für Benzin (1,25 €/l) und Gemischöl 5,80 €/l (Mischung: 1:40).

Die Kostensumme für den Pfad 1 weist demnach einen Energiekostenbetrag von 1,25 € je Festmeter aus. Bei den Pfaden 2 bis 4 steigen diese Kosten auf Werte zwischen 1,53 €/Fm (Pfad 2) und 2,44 €/Fm (Pfad 3). In Relation zu den Gesamtkosten (vgl. Tab. 42) liegen die spezifischen Ener-

giekosten somit bei lediglich 1,8% für Pfad 1. Sie steigen auf 2,8% für Pfad 2 bzw. auf 7,1% für Pfad 3 und 13,5% für Pfad 4. Das bedeutet, dass die spezifischen Energiekosten mit zunehmender Rationalisierung wegen der insgesamt sinkenden spezifischen Gesamtkosten (Tab. 42) und den steigenden Transportentfernungen einen zunehmenden Kostenfaktor darstellen.

Allerdings sind die Gesamtenergiekosten auch von den im Einzelnen aufgewendeten Energieträgern abhängig, deren Anteile in Kapitel 5.9.5 (Tab. 38) zusammengestellt sind. In Kapitel 5.3.4 wird dargestellt, dass der Energieverbrauch (und damit auch die Energiekosten) in der Regel deutlich sinken, sobald anstelle von Kraftstoffen elektrischer Strom eingesetzt werden kann.

Tab. 41: Spezifische Energiekosten (€/Fm) der Prozessketten

Verfahrensschritt	Pfad 1 Freizeit- Selbstwerber (€/Fm)	Pfad 2 Waldbauer 1, gering mecha- nisiert (€/Fm)	Pfad 3 Waldbauer 2, höher mecha- nisiert (€/Fm)	Pfad 4 Professionel- les Scheit- holzgewerbe (€/Fm)
Holzernte + Rücken (Selbstwerber, 1 m)	0,42	0,42	-	-
Holzernte + Rücken Traktor/Seilwinde	-	-	0,67	-
Holzernte (Jungdurchforstung, Harvester)	-	-	-	1,24
Holzernte Rücken (Jungdurchforst., Forwarder)	-	-	-	0,58
Laden (33 cm von Hand geschüttet lose)	-	0,00	-	-
Laden (33 cm maschinell geschüttet lose)	-	-	0,07	0,07
Laden (1 m ungespalten von Hand)	0,00	0,00	-	-
Laden (mit Kran)	-	-	0,10	0,10
Transport (PKW + Anhänger)	0,33	-	-	-
Transport 1 (Traktor + Anhänger)	-	0,26	0,26	-
Transport 2 zum Kunden (Traktor+Anhänger)	-	0,48	0,97	-
Transport 1 Verarbeitungsplatz (LKW)	-	-	-	0,38
Transport 2 zum Kunden (LKW)	-	-	-	2,21
Abladen 1 (kippen)	0,06	0,06	0,06	0,06
Abladen 2 beim Kunden	-	0,06	-	-
Abladen (Kran)	-	-	0,07	0,07
Ablängen Kreissäge (auf 33 cm)	0,14	0,14	-	-
Spalter klein	0,30	-	-	-
Spalter groß	-	0,12	-	-
Beschicken maschinell (mit Kran)	-	-	0,10	0,10
Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	0,15	-
Große kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	-	0,33
Schichten (33 cm gespalten)	0,00	0,00	-	-
Summe Energiekosten (€/Fm):	1,25	1,53	2,44	5,14

5.9.6.3 Gesamtkosten in den Prozessketten

Bei Gesamtkosten werden die Ergebnisse aus den Maschinenkostenberechnungen (Kapitel 5.9.6.1), den spezifischen Energiekostenberechnungen (Kapitel 5.9.6.2) sowie zu den Arbeitszeitaufwendungen (Kapitel 5.9.3) zusammengeführt. Zusätzlich sind weitere Kostenannahmen zu treffen. Bei den Maschinen und Geräten, zu denen keine eigenen Berechnungen durchgeführt wor-

den waren, wurde auf weitere Datenquellen zurückgegriffen. Aus den Empfehlungen des Kuratoriums Bayerischer Maschinen- und Betriebshilfsringe (KBM) wurden die Stundensätze für einen Traktor als Zugmaschine (9 €/h für 54 kW Allrad, ohne Kraftstoff) bzw. nur für stationäre Antriebszwecke (6 €/h, ohne Kraftstoff) entnommen. Ebenfalls gelten die KBM-Sätze für 8-t-Transportanhänger (4 €/h), eine Seilwinde (5 €/h) und einen Radlader (29 €/h). Für die Kosten des Harvester- und Forwardereinsatzes wurde auf Daten von PAUSCH [50] zurückgegriffen, wobei darin die meist deutlich höheren Lohnkosten für dieses Teilverfahren bereits enthalten sind. Bei den Transporten wird bei Traktorgespannen nach Zeit abgerechnet, während für PKW-Transporte ein entfernungsabhängiger Kostensatz von 0,30 € je gefahrenem Kilometer berechnet wird und nur der PKW-Anhänger mit 6 €/h in die Berechnung eingeht. LKW-Transporte werden dagegen mit einem Stundensatz von 45 €/h verrechnet, wobei zusätzlich ein Kilometerzuschlag von 0,75 €/km angesetzt wird (in Anlehnung an [12]). Alle Rückfahrten gehen als Leerfahrt mit dem vollen Kostenansatz in die Berechnung ein.

Bei den Lohnkosten wurde ein Ansatz von 15,24 €/h für die Bedienung der großen kombinierten Säge-Spaltmaschine und für den Fahrer eines LKW gewählt, ansonsten gehen die Lohnkosten für Arbeiter oder Traktorfahrer mit 11,46 €/h in die Bewertung ein, dieser Wert entspricht dem Standardsatz des KTBL [37]. Der Arbeitszeitbedarf in diesen beiden Lohngruppen richtet sich nach dem in Kapitel 5.9.3 (Tab. 36) aufgelisteten spezifischen Zeitbedarf je Festmeter Scheitholz für die jeweiligen Teilverfahrensschritte der Prozesskette.

Die aggregierten Gesamtkosten der hier definierten Prozesskettenmodelle sind in Tab. 42 dargestellt. Sie liegen bei ca. 70,66 €/Fm für die Scheitholzbereitstellung in Pfad 1 („Freizeit-Selbstwerber“) und reduzieren sich bei Pfad 3 auf 34,18 €/Fm, während sie bei Pfad 4 wieder leicht auf 38,15 €/Fm ansteigen. Die Kostenreduzierung bei Pfad 3 und Pfad 4 ist allerdings nur möglich, wenn eine für die jeweiligen Investitionen angemessene Auslastung der Maschinen erreicht wird. Beispielsweise wird für die große kombinierte Säge-Spaltmaschine ein jährlicher Einsatz von 1000 Stunden bei einer Nutzungsdauer von 10 Jahren angesetzt (vgl. Tab. 40).

Auch bei den beiden Prozessketten des Waldbauers (Pfad 2 und 3) kommt es zu einer Kostenreduzierung gegenüber dem Selbstwerber. Hier schlagen sich vor allem die deutlichen Kostensenkungen für den Wechsel vom kleinen zum großen Senkrechtpalter nieder, dieser weist eine höhere Verarbeitungsleistung, auf was zu entsprechenden Lohnkosteneinsparungen führt (vgl. hierzu auch Tab. 36 in Kapitel 5.9.4). Mit der höheren Mechanisierung in Pfad 3 ergeben sich weitere deutliche spezifische Kostensenkungen, die vor allem auf die Leistungssteigerung bei der Holzernnte und beim Laden sowie auf das verzichtbare Ablängen durch den Wechsel auf die kleine kombinierte Sägespaltmaschine zurückzuführen sind (Tab. 42). Allerdings wurde bei den Maschinenkosten hier ebenfalls eine höhere Auslastung unterstellt, so dass auch zwischen Pfad 2 und Pfad 3 eine Steigerung des Gesamtaufkommens vorausgesetzt wird. Generell sind die vier Pfade somit nicht als Verfahrensalternativen, sondern als nebeneinander existierende Produktionsketten mit unterschiedlichen Einsatzoptima zu interpretieren, zumal auch die Gesamtjahresproduktion aufgrund der angenommenen Auslastung für die Aufbereitungsmaschinen zwischen 97 Rm und 3511 Rm schwankt (vgl. Kapitel 5.9.2). Somit sind für einen Wechsel unter den verschiedenen Pfaden neben der Investition in andere Maschinen und Veränderungen des Produktionsablaufes auch neue Vertriebswege und Absatzmöglichkeiten erforderlich.

Tab. 42: Spezifische Gesamtkosten der Scheitholzbereitstellung in den einzelnen Prozessketten (€/Fm). Angaben inkl. Energie- und Lohnkosten

Verfahrensschritt	Pfad 1 Freizeit-Selbstwerber (€/Fm)	Pfad 2 Waldbauer 1, gering me- chanisiert (€/Fm)	Pfad 3 Waldbauer 2, höher me- chanisiert (€/Fm)	Pfad 4 Professionel- les Scheit- holzgewerbe (€/Fm)
Holzernte + Rücken (Selbstwerber, 1 m)	21,84	21,84	-	-
Holzernte + Rücken Traktor/Seilwinde	-	-	19,30	-
Holzernte (Jungdurchforstung, Harvester)	-	-	-	11,74
Holzernte Rücken (Jungdurchforst., Forwarder)	-	-	-	6,87
Laden (33 cm von Hand geschüttet lose)	-	1,72	-	-
Laden (33 cm maschinell geschüttet lose)	-	-	0,38	-
Laden (1 m ungespalten von Hand)	3,47	3,47	-	-
Laden (mit Kran)	-	-	0,65	0,65
Transport (PKW + Anhänger)	0,56	-	-	-
Transport 1 (Traktor + Anhänger)	-	1,28	1,28	-
Transport 2 Kunde (Traktor + Anhänger)	-	2,39	4,79	-
Transport 1 Verarbeitungsplatz (LKW)	-	-	-	0,98
Transport 2 Kunde (LKW)	-	-	-	6,64
Abladen 1 (Kippen)	0,32	0,32	0,32	0,32
Abladen 2 beim Kunden	-	0,32	-	-
Abladen (Kran)	-	-	0,47	0,47
Ablängen Kreissäge (auf 33 cm)	7,65	7,65	-	-
Spalter klein	29,62	-	-	-
Spalter groß	-	9,10	-	-
Beschicken maschinell (mit Kran)	-	-	0,65	0,65
Kleine kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	6,35	-
Große kombinierte Säge-Spaltmaschine	-	-	-	9,46
Schichten (33 cm gespalten)	7,21	7,21	-	-
Summe Gesamtkosten, ohne Rohholzkau (€/Fm):	70,66	55,29	34,18	38,15
<i>Zum Vergleich: Kosten in €/Rm für 33 cm Scheite, gestapelt)^a</i>				
Summe Gesamtkosten, ohne Rohholzkau (€/Rm):	44,52	34,38	21,53	24,04
Zuschlag für Rohholzkau (€/Rm):	10	10	10	10
Summe Gesamtkosten, mit Rohholzkau (€/Rm):	54,52	44,38	31,53	34,04

^a Zu den verwendeten Faktoren für die Umrechnung von Festmeter zu 33-er Scheiten siehe Kapitel 5.8.1. Für Kostenangaben, die sich auf gespaltenes Meterholz beziehen sollen, sind Abschläge gemäß der Umrechnungsfaktoren erforderlich.

Für das vom Selbstwerber geerntete Holz wird, wenn der Wald nicht in Eigenbesitz ist, normalerweise auch ein (relative geringer) Preis ab Wald vom Amt für Landwirtschaft und Forsten oder vom Waldbesitzer in Rechnung gestellt. Dieser Betrag liegt bei Selbstwerbern, die bei der Durchforstung meist Schwachholz aufbereiten, derzeit meist in der Größenordnung von 5 bis 15 €/Rm (ungespaltenes Meterscheitholz). Für die zusätzliche Berechnung der Gesamtkostensumme in Tab. 42 wurde dieser Wert als Kostenzuschlag in allen Modellprozessketten aus Gründen der Vergleichbarkeit einheitlich mit 10 €/Rm (Meterholz Rundlinge) angesetzt, wobei auf eine Preis-

umrechnung für gestapelte Kurzscheite (33 cm) wegen der nur geringfügige Raumbedarfsunterschiede (vgl. Kapitel 5.8.1) verzichtet wird.

Bei den höher mechanisierten Verfahren (Pfad 3 und 4) ist jedoch dieser einheitliche Rohholzpreisansatz weniger sinnvoll, da hier anstelle einer Beerntung in Eigenregie meist ein direkter Ankauf fertig aufbereiteter Industrieholzsortimente für die Weiterverarbeitung erfolgt. Hier wird daher ein Ankaufspreis für das Rohholz von 24 € je Festmeter (Fixlängen) zuzüglich Laden und Transport angesetzt. Bezogen auf den Raummeter (Meterholz Rundlinge) ergibt sich somit ein Rohholzpreis von ca. 13 €/Rm. Für diese Berechnungsvariante liegen die Gesamtkosten mit Rohholzankauf dann bei 19,33 €/Rm (Pfad 3) bzw. 26,12 €/Rm (Pfad 4); sie unterscheidet sich somit nur um ca. ± 2 €/Rm von den in Tab. 42 dargestellten Modellkosten ohne Rohholzankauf in Pfad 3 und 4.

Bei der Betrachtung der Kostenanteile, die in Abb. 106 für die einzelnen Phasen der Bereitstellungskette errechnet wurden, fällt auf, dass die Lohnkosten bei zunehmender Rationalisierung durch die Maschinenkosten ersetzt werden. Größere Einsparpotentiale finden sich dann nur noch bei der Holzernte, die aber oft durch Zukauf von Industrieholz wegfällt und beim Transport zum Kunden.

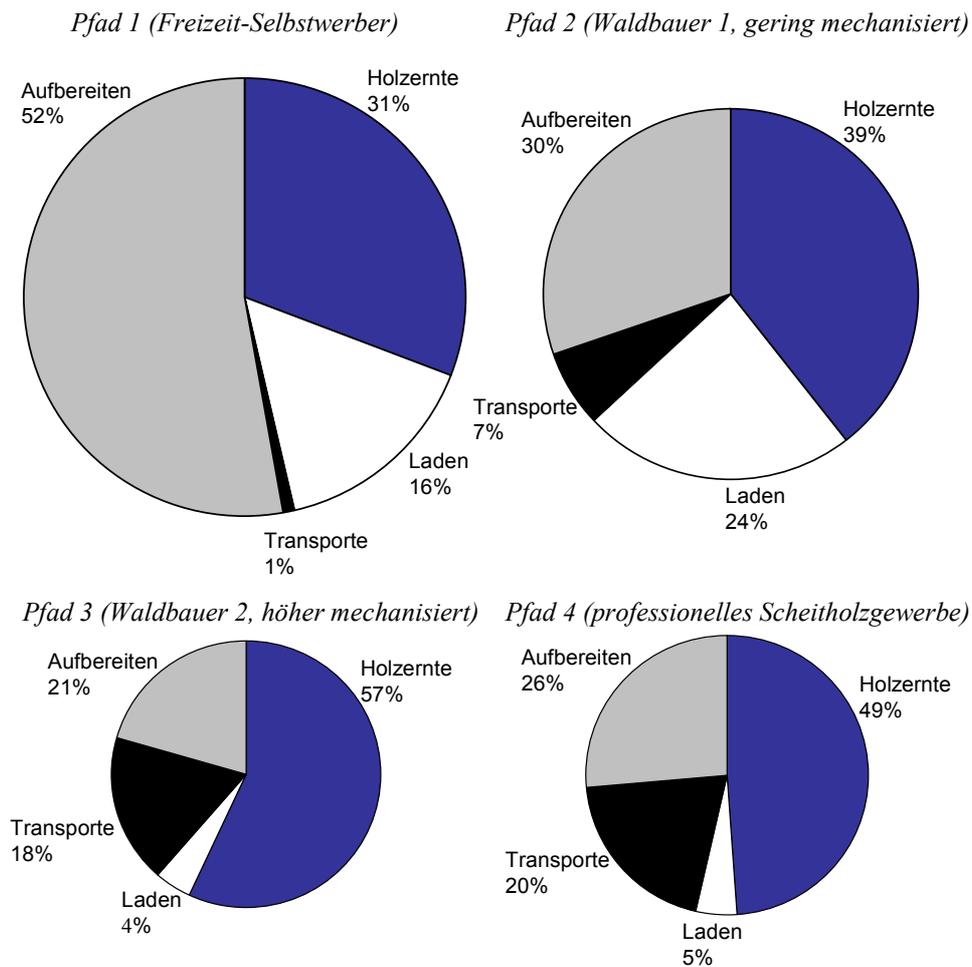


Abb. 106: *Kostenanteile verschiedener Phasen der Scheitholzbereitstellung, dargestellt für die vier ausgewählten Modellverfahrensketten. Holzernte: Holzernte und Rücken. Transporte: Hin- und Zurück Wald-Bearbeitungsplatz-Kunde. Laden: Be- und Entladen und Aufsichten des Holzes. Aufbereiten: Ablängen, Spalten, Beschriften*

Eine Zuordnung auf die drei Kostengruppen Maschinenkosten, Lohn- und Energiekosten zeigt Abb. 107. Hier fällt auf, dass mit zunehmender Mechanisierung der Anteil der Lohnkosten zugunsten des Anteils der Maschinenkosten geringer wird. Die Energiekosten erhöhen sich von 2% auf 16% am Anteil der Bereitstellungskosten. Dies liegt neben dem gesteigerten Energiebedarf der einzelnen Maschinen auch am gesteigerten Transportaufkommen.

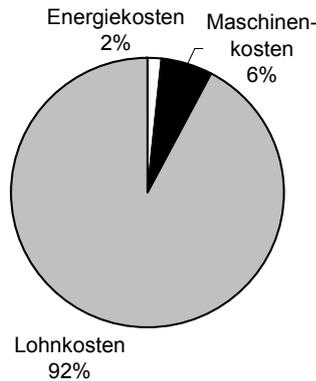
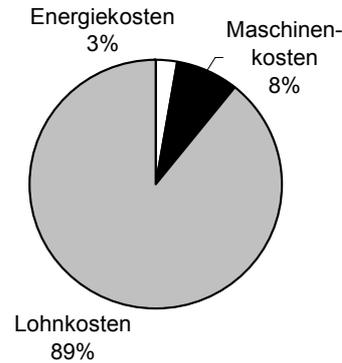
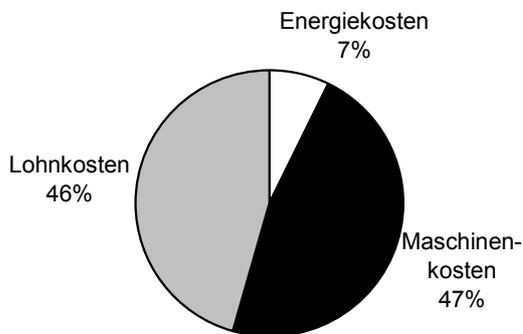
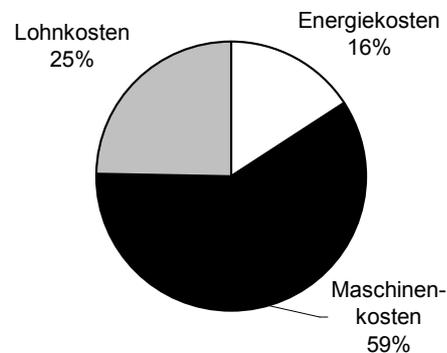
Pfad 1 (Freizeit-Selbstwerber)*Pfad 2 (Waldbauer 1, gering mechanisiert)**Pfad 3 (Waldbauer 2, höher mechanisiert)**Pfad 4 (professionelles Scheitholzgewerbe)**

Abb. 107: Zuordnung der Bereitstellungskosten in den Modellverfahrensketten nach Kosten-
gruppen

* bei Pfad 4 ohne Holzerntekosten (Variante Holzzukauf)

Vielfach sind in der Praxis abweichende Berechnungsannahmen erforderlich. Für einen Selbstwerber, beispielsweise, der nur eine geringe Brennholzmenge benötigt, ist eine Anrechnung von Lohnkosten oft dann nicht sinnvoll, wenn dieser die Waldarbeit als Bewegungsausgleich für eine sitzende Tätigkeit auffasst. In diesem Fall sinken die Gesamtkosten von 44,52 €/Raummeter (33-er Scheite, ohne Rohholzkauf) relativ deutlich auf 3,52 €/Rm, da die Bereitstellung im Pfad 1 sehr arbeitsintensiv ist. Wenn für das Rohholz noch üblicherweise 10 €/Rm zusätzlich an den Waldeigentümer zu vergüten sind, liegen die Gesamtkosten bei 54,52 €/Rm (mit Lohnansatz) bzw. 13,52 €/Rm (ohne Lohnansatz) für das 33-er Kurzscheitsortiment.

5.9.7 Prozesskettenvergleich

Die in den vorangegangenen Kapiteln aggregierten Prozesskenndaten sind in Tab. 43 und Abb. 108 vergleichend zusammengestellt, wobei wegen der zunehmenden Bedeutung zusätzlich auch die Kosten je Schüttraummeter ofenfertiges Scheitholz ausgewiesen sind. Wie erwartet steigen mit zunehmender Mechanisierung der Energiebedarf und damit auch die Energiekosten an, wohingegen sich der Zeitbedarf verringert. Die Gesamtkosten zeigen aber auch, dass kostendeckend gearbeitet wird, wenn die Scheitholzverkaufspreise, die in HÖLDRICH [29] ermittelt wurden, er-

zielt werden. Selbst der Freizeit-Selbstwerber würde bei Verkauf seines Brennholzes noch inklusive des Lohnanspruchs für diesen sehr arbeitsintensiven Pfad einen Gewinn erzielen können. Das gilt umso mehr, da die Lohnkosten, die hier mit 11,46 €/h (außer Maschinenführer: 15,24 €/h) inklusive der Lohnnebenkosten angesetzt wurden, in der Praxis oft unterboten werden, zumal hierfür oft nicht oder nur gering qualifiziertes Personal (z. B. Saisonarbeiter) aus dem In- und Ausland zu besonders niedrigen Löhnen eingesetzt werden.

Trotz höheren Absatzes (vgl. 5.9.2) steigen die Gesamtkosten für das professionelle Scheitholzgewerbe (Pfad 4) im Vergleich zum höher mechanisierten Waldbauern (Pfad 3). Einen Umstieg dieses professionellen Scheitholzgewerbes auf einen niedrigeren Mechanisierungsgrad ist aber aufgrund der erforderlichen Leistungsfähigkeit, der Möglichkeit auch stärkeres Rundholz zu verarbeiten und wegen dem erforderlichen gesteigerten Logistikaufwand nur schwer möglich.

Tab. 43: *Gesamtvergleich aller Bewertungsmerkmale für die vier definierten Modell-Prozessketten der Scheitholzbereitstellung*

Bewertungsmerkmal	Pfad 1 Freizeit- Selbstwerber	Pfad 2 Waldbauer 1, ge- ring mechanisiert	Pfad 3 Waldbauer 2, höher mechanisiert	Pfad 4 Professionelles Scheitholzgewerbe
Arbeitsschwere (Index):	161	168	142	106
Zeitbedarf (h/Fm):	5,70	4,24	1,27	0,49
Energiebedarf (kWh/Fm):	8,9	12,5	22,5	47,4
Energiekosten (€/Fm):	1,20	1,48	2,44	5,14
Gesamtkosten (€/Fm):	70,66	55,29	34,18	38,15
<i>Gesamtkosten (€/Rm)^a:</i>	<i>44,52</i>	<i>34,83</i>	<i>21,53</i>	<i>24,04</i>
<i>Gesamtkosten (€/SRm)^b:</i>	<i>28,97</i>	<i>22,67</i>	<i>14,01</i>	<i>15,64</i>

^a bezogen auf 33 cm Scheite, gespalten und geschichtet

^b bezogen auf 33 cm Scheite, gespalten und geschüttet

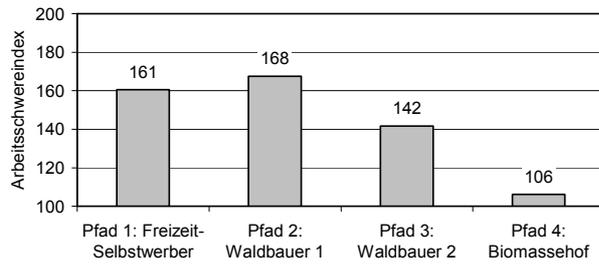
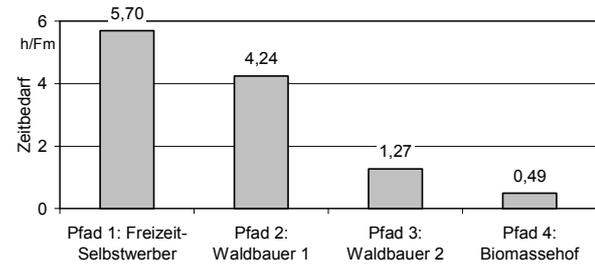
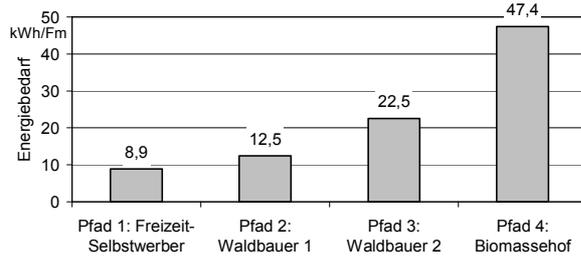
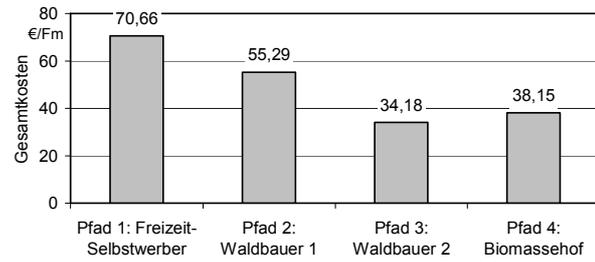
Arbeitsschwereindex nach OWAS*Zeitbedarf**Energiebedarf**Gesamtkosten*

Abb. 108: Zusammenstellung der Bewertungskenngrößen für die einzelnen Modelverfahrensketten, hier bezogen auf je einen Raummeter 33-er Scheite, gestapelt (außer OWAS: dimensionslos, Beginn bei 100, da niedrigster Wert des OWAS-Indexes). Zur Umrechnung auf andere Volumenmaße und Sortimente siehe Kapitel 5.8.1

6 Schlussfolgerungen

In den umfangreich durchgeführten Zeitstudien im Bereich der Holzernte JD und der Scheitholzbereitstellung hat sich die Methode mit Palm und UMT Software zur Zeitaufnahme in Verbindung mit dem PC und der STATUMT Software zur Vor- und Nachbereitung der Zeitstudien bewährt. Das System UMT deckt in Verbindung mit einem PDA und PC die gesamte Bandbreite der Anforderungen forstlicher Zeitstudien ab. Selbst bei Temperaturen unter -15° Celsius konnten in ganztägigen Zeitstudien problemlos Daten erhoben werden. Von Vorteil ist bei diesem System die durchgängige Verwendung von Standardhard- und -software, was sich in einer hohen Benutzerfreundlichkeit widerspiegelt. Die Konfiguration eines individuellen Erhebungsschemas lässt sich am PC erstellen. Sowohl die Erhebung als auch die einfache Datenübernahme in statistische Auswertungsprogramme führten zu einer rationalisierteren Arbeitsweise bei der Aufnahme von Zeitstudien. Die Software UMT stellt somit eine praxisreife Lösung für Zeitstudienaufnahme dar und die entsprechende Hardware bietet zusätzlich eine Vielzahl alternativer Anwendungsmöglichkeiten. Zukünftig wird der Palm von neuen elektronischen Systemen wie z. B. den sogenannten Pocket PCs mit entsprechender Software ersetzt werden, wobei darauf geachtet werden muss, dass die elektronischen Geräte für den forstlichen Einsatz robust genug sind.

Zum ersten Mal wurde eine Zeitstudie der Selbstwerber-Holzernte bei einer Jungdurchforstung durchgeführt, da dies wegen der zu erwartenden Unterschiede zur professionellen Holzernte für eine aussagekräftige ökonomische Bewertung im Bereich Brennholzproduktion notwendig erschien. Die erhaltenen Werte liegen leicht über den Werten, die für die Brennholzernte im Einheitssortentarif (EST) angegeben werden. Die Einschätzung von Selbstwerbern bei der Scheitholzproduktion, welche bei einer Umfrage im Durchschnitt $0,86 \text{ Fm/h}$ für die Ernte eines Festmeters schätzten, liegt im Vergleich zu den Ergebnissen der Zeitstudien mit $1,16 \text{ Fm/h}$ tiefer. Folglich überschätzen die Selbstwerber ihre Leistung leicht. Es herrschen aber im Einzelnen große Unterschiede in der technischen Arbeitsproduktivität. Diese resultieren neben der unterschiedlichen Leistung der einzelnen Probanden vor allem aus den verschiedenen Holzernte-Verfahren. So verbessert die Verwendung einer Seilwinde beim Rücken und damit das Aushalten längerer Rundhölzer als 1 m die Holzernte ebenso wie die Ernte dickerer Stämme (Stückmassegesetz) entscheidend und sollte daher bei der Verarbeitung größerer Mengen in Erwägung gezogen werden. Die Holzernte erscheint nur mit dem geeigneten Verfahren und einem eigenen Wald sinnvoll, denn bei einem Stundenlohn von 11 € belaufen sich die Lohnkosten für das Ernten und Rücken eines Festmeters Holz auf ca. 23 € [4], was derzeit dem Kaufpreis für einen Festmeter Industrieholz I_N entspricht. Da häufig noch Preise für das als Selbstwerber geerntete Holz gezahlt werden muss, lohnt es sich eher, das Holz zuzukaufen.

Viele unterschiedliche Geräte wurden für die Bereitstellung von Scheitholz untersucht, um der Bewertung aller aufgeführten Produktionspfaden gerecht werden zu können, denn für die Produktion unterschiedlicher Mengen ist der Einsatz jeweils verschiedener Geräte für den optimalen Einsatz notwendig. Und so werden große Unterschiede beim Bereitstellen von Scheitholz allein durch den Einsatz verschiedener Maschinen sichtbar. Aber auch verschiedene Einflussfaktoren bei dem selben Verarbeitungsgerät wie die Baumart oder der Rundholzdurchmesser des Ausgangsmaterials, lassen die technische Arbeitsproduktivität schwanken. Um typische Werte aus der Praxis zu

erhalten, wurden die Untersuchungen bei Brennholzhändlern in der Praxis durchgeführt. So sind Aussagen über die typischen Sortimente der Brennholzherstellung möglich. Da auch der optimale Durchmesser verschiedener Produktionsmethoden ermittelt wurde, wird ersichtlich, dass die tatsächliche Rundlingstärke meist unter der für die technische Arbeitsproduktivität optimalen und damit oft unter den Herstellerangaben liegt. Dies betrifft vor allem die kombinierten Säge-Spaltmaschinen bei denen der tatsächliche mittlere Durchmesser des Ausgangsmaterials (15,2 cm bei kleinen und 25,89 cm bei den großen) weit unter den idealen Durchmessern liegt (jeweils maximal möglicher Durchmesser also von 30 cm bis 65 cm bei den untersuchten Geräten). Dennoch sinkt mit dem zunehmenden Grad an Mechanisierung der Zeitaufwand zur Verarbeitung des Holzes. Das bedeutet auch, dass keine neuen Absatzmärkte für Schwachholz der ersten Durchforstungen für die Brennholzproduktion gewonnen werden können, da auch bei der Brennholzernte die stärkeren Sortimente die kostengünstigeren sind.

Zum Zeitpunkt der Untersuchungen in den Jahren 2003 und 2004 waren in dem relativ neuen Segment der großen kombinierten Säge-Spaltmaschinen alle untersuchten Maschinen noch störanfällig oder wurden vom Betreiber provisorisch verbessert, so dass für die Zukunft neben der bereits laufenden Verbesserung der Maschinen durch die Hersteller, weitere arbeitswissenschaftliche Untersuchungen hinsichtlich der Fehleranfälligkeit und Leistung der Maschinen neueren Typs einhergehen müssen, was sicherlich zu einer weiteren Verbesserung der TAP und damit zu noch besseren spezifischen Kosten in diesem Bereich führen wird.

Das Bereitstellen von Scheitholz kann auf viele unterschiedliche Arten durchgeführt werden. In der vorliegenden Arbeit wurde durch eine umfangreiche Untersuchung und beispielgebenden Prozessketten in sogenannten Pfaden versucht einer Bewertung dieser Vielfalt gerecht zu werden. Bei den zusammengestellten Prozessketten ist der Freizeit-Selbstwerber nicht vergleichbar mit den Anderen, da dort die Arbeitszeit nicht berechnet werden sollte. Beim Freizeit-Selbstwerber dient die Arbeit vornehmlich der Erholung mit dem Nebeneffekt, dass dabei Brennholz für einen geringen Verbrauch meist für einen Kaminofen zu Verfügung steht. Dieser Pfad wurde trotzdem aufgeführt, damit diese Selbstwerber einen Überblick von den anfallenden Kosten ihres Hobbys bekommen können. Bei allen anderen Pfaden dient die Arbeit einem Einkommen, bei dem die Arbeitszeit in die Berechnung der Kosten miteinbezogen werden muss. Die Pfade wurde so gewählt, dass sich jeder Interessierte annähernd in einem der Pfade wiederfindet und gegebenenfalls durch geringfügiges Ändern beim Zusammensetzen der einzelnen Arbeitsablaufabschnitte seine eigenen Produktionskosten abschätzen kann. Allgemein wird bei den Pfaden 1 bis 4 deutlich, dass bei zunehmendem Grad der Rationalisierung, geringere spezifische Kosten anfallen. Mit den derzeitigen durchschnittlichen Scheitholzpreisen für ofenfertiges Scheitholz in Deutschland, z. B. 33 cm Scheite Buche von 63,50 € [29], ist mit allen aufgeführten Varianten ein Verdienst möglich; am meisten mit der größten Rationalisierung trotz hoher Investitionskosten, unter dem Vorbehalt, dass der Absatz und somit die Auslastung der Maschinen gewährleistet ist. Somit ist eine Rationalisierung vieler Scheitholzhersteller durch einen Umstieg vom momentan am meisten verwendeten Gerätes, dem großen Senkrechtpalter (siehe Tab. 35), hin zu kombinierten Säge-Spaltmaschinen zu empfehlen. Um die Auslastung dieser Maschinen zu gewährleisten sollten sich die Investitionen einige Bereitsteller von Scheitholz teilen, wie das z. B. Forstbetriebsgemeinschaften, Waldbesitzervereinigungen oder Maschinenringe vereinzelt schon vermögen.

Die Methode der Energieverbrauchsmessung wurde, wo es möglich war, in bewährter Weise durch Messung des Kraftstoffs beziehungsweise des Stromverbrauchs während der Untersuchungen der Zeitstudien durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen mit 1,25 €/Fm bei Pfad 1 bis maximal 5,14 €/Fm bei Pfad 4 (vgl. 5.9.6.2), dass die spezifischen Energiekosten einen kleinen Anteil an den Gesamtkosten haben. Bei den Geräten, mit denen ein elektrischer Antrieb und ein Antrieb mit Verbrennungsmotor vorhanden war und dadurch der Verbrauch beider Antriebsarten gemessen werden konnte, zeichnete sich der Antrieb durch Strom durch sehr viel geringere Energiekosten im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor aus, so dass betriebswirtschaftlich zu elektrischen Antrieben geraten werden muss. Dabei wird jedoch die Mobilität eingeschränkt, da die Abhängigkeit eines Stromanschlusses ein Spalten im Wald unmöglich macht.

Das Messen der körperlichen Belastung am Arbeitsplatz, ohne auf den Probanden einen Einfluss zu nehmen, stellt hohe Anforderungen an die Messmethode. Mit der Methode nach OWAS konnte auch für den Bereich der Holzernte und Scheitholzbereitstellung durch kleine Erweiterungen wie z. B. dem Einsatz eines digitalen Camcorders eine taugliche Methode zur Messung der Belastungen für die Arbeit gefunden werden, die sich ja im Einsatz verschiedener Arbeiten z. B. in der Stahlindustrie oder der Forstwirtschaft schon bewährt hatte. Mit ihr können die körperlichen Belastungen vergleichsweise einfach und dennoch aussagekräftig ermittelt werden. Ein Belastungsindex L nach Lundquist gibt die Höhe der Belastung an, der für den Bereich der Scheitholzbereitstellung in Kategorien der Umgangssprache eingeordnet werden konnte (vgl. Tab. 19). Aus den Untersuchungen wird ersichtlich, dass der Grad der Belastung mit zunehmender Mechanisierung stark abnimmt, wodurch auch aus Sicht der Arbeitsbelastung zu einer Rationalisierung durch eine hohe Mechanisierung, in diesem Fall durch kombinierte Säge-Spaltmaschinen geraten werden muss. Wie in anderen Arbeitsbereichen auch, so wird bei hochmechanisierten Arbeitsplätzen vermutlich die Monotonie ein neues Problem in diesem Bereich darstellen. So werden zukünftig Lösungen und Möglichkeiten für eine abwechslungsreiche Gestaltung der Arbeit zu suchen sein.

Da unterschiedliche Methoden beim Messen von Raummetern vorgefunden wurden und die eigene Messmethode wissenschaftlichen Ansprüchen, d. h. vor allem der Messgenauigkeit und der Wiederholbarkeit genügen musste und zugleich auch der Verwendung in der Praxis Nahe kommen sollte, zusätzlich sämtliche Sortimenten wie langes und kurzes Holz, geschichtet und geschüttet messbar sein mussten, wurde ein Messverfahren mit einem eigens entworfenen Messrahmen definiert, in dem diese Messungen in großer Zahl durchgeführt werden konnten. Es zeigte sich, dass zwischen den einzelnen Schichtholzsortimenten nennenswerte Unterschiede bestehen. Sie bewirken, dass ein Brennholzkunde, der sich vom Verkäufer einen Raummeter gespaltenes Meterholz offenfertig aufbereiten lässt, bei der Anlieferung als 33-er Kurzscheite nur noch 0,81 Rm (Buche) bzw. noch 0,86 Rm (Fichte) erhält. Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass die pauschale Anwendung eines einheitlichen Umrechnungsfaktors von Massivholz zu Schichtholz nicht sinnvoll ist. Insbesondere der in der Praxis bekannte und in verschiedenen Quellen immer wieder genannte Umrechnungsfaktor von 1,43 (d.h. 1 Fm entspricht 1,43 Rm Schichtholz) sollte durch Verwendung differenzierterer Werte abgelöst werden, zumal sich dieser pauschale Wert selbst für die relativ dichtlagernden offenfertigen Kurzscheite als erkennbar zu niedrig herausgestellt hat und ursprünglich nur als statistischer Wert eingesetzt werden sollte weil er den tatsächlichen Gehalt an Holzmasse nur ungenau widerspiegelt (vgl. [32]). Bei den Schichtholzsortimenten sind die gemessenen Holzartenunterschiede noch relativ gering. Erst beim Schüttgutvolumen von Kurzschei-

ten treten größere Unterschiede zutage, hier beansprucht Fichtenholz ein deutlich größeres Volumen, als die gleiche Ausgangsmenge Buchenholz. Dieses Ergebnis zeigt, dass die Umrechnungsfaktoren vor allem bei Schüttgut nicht ohne weiteres für verschiedene Holzarten einheitlich verwendet werden können. Um Missverständnisse zu vermeiden sollte der Brennstoffverkäufer gegenüber dem Kunden die Bezugsbasis für seine Preisfestlegung eindeutig mitteilen und dabei die nach Sortiment differenzierten Umrechnungsfaktoren verwenden. Bei Verkäufen auf Basis der Schüttgutmaße sollte nach Holzart differenziert umgerechnet werden, wobei die Werte für andere Hölzer als Buche und Fichte sowie für anderes Ausgangsmaterial wie z. B. Kronenholz aus Schlagabraum oder Holz älterer Bäume, noch ermittelt werden müssten. Als neue Methode bei der Bestimmung der Umrechnungsfaktoren, kann die optische Auswertung, mit Hilfe einer Flächenbestimmungssoftware durchgeführt werden.

Um den Anforderungen an eine saubere und effiziente Verbrennung gerecht zu werden, fordern die Hersteller von Holzverbrennungsanlagen einen Wassergehalt des Holzes von 20% und darunter. Bisher waren Lagerzeiten für Nadelholz von einem Jahr und für Laubholz von zwei bis drei Jahren üblich. Das monatliche Messen des Gewichtes verzurrter Rundholzbündel hat sich bewährt; die Verläufe der Wassergehalte konnten dadurch veranschaulicht werden. Da die klimatischen Verhältnisse der Jahre nicht immer einheitlich sind, musste der Versuch im folgenden Jahr fortgeführt und zusätzlich frisches Holz für eine neue Messreihe eingelagert werden. Wie dieser über zwei Jahre andauernde Versuch mit verschiedenen Baumarten zeigt, waren die Unterschiede im Trocknungsverlauf in den verschiedenen Jahren gering. Es reicht eine Lagerdauer bei frisch geerntetem und sofort gespaltenem Scheitholz von einem Jahr. Kürzere Lagerzeiten sind möglich; dabei sollte sich die Lagerzeit aber immer mindestens über die komplette Sommerperiode (von April bis einschließlich August) erstrecken. Eine Unterscheidung der Baumarten ist dabei nicht nötig. Je weiter das Holz verarbeitet wird, also je kürzer und kleiner gespalten die Scheite sind, desto schneller trocknen diese. Ab September zieht das Holz aber wieder Feuchtigkeit aus der umgebenden Luft, daher ist es geboten, das Holz ab September abzudecken. Eine bessere Lagermöglichkeit stellt eine Halle dar, welche nach einer Seite hin geöffnet ist und an der Rückseite perforierte Wände für eine gute Durchlüftung besitzt. Die Messungen erfolgten in Bayern an zwei klimatisch verschiedenen Orten (800 mm bzw. 1200 mm Jahresniederschlag). Um eine bundesweit gültige Aussage treffen zu können sollten weitere Messungen in klimatisch unterschiedlichen Gebieten z. B. in Norddeutschland durchgeführt werden.

Trotz eines hohen Messaufwandes bei der Bestimmung des Anfangs- und Endwassergehalts des Holzes, der für die Bestimmung der Trockenmasse notwendig ist, führt die Methode auf Grund der großen Streuung der Wassergehalte der einzelnen Scheite, besonders des Anfangwassergehalts, nur zu einer Annäherung an den tatsächlichen Wert. Mit 5% Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Scheitholz an einem gut durchlüfteten Lagerstandort ist der Verlust bei einer zweijährigen Lagerung vernachlässigbar. Da eine Lagerdauer von einem Jahr ausreichend ist, dürften die Trockenmasseverluste noch geringer ausfallen. Für eine erneute Untersuchung der Trockenmasseverluste wäre eine zerstörungsfreie genaue Bestimmung des Wassergehaltes, wie sie eine computerunterstützte tomographische Untersuchung ermöglicht, einzusetzen.

7 Zusammenfassung

Vor allem in privaten Haushalten entscheiden sich die Hauseigentümer – falls eine Holzfeuerung verwendet werden soll – in der überwiegenden Zahl aller Fälle für eine Scheitholzheizung. Damit ist Scheitholz immer noch der Hauptbrennstoff innerhalb der Kategorie "Brennholz", welche mit ca. 45% den größten Einzelbeitrag zum Bioenergieaufkommen Bayerns leistet. In den letzten Jahren ist zudem ein Ansteigen des Scheitholzbedarfs erkennbar. Das führte unter anderem dazu, dass "ofenfertiges" Scheitholz bei den meisten Anbietern schon vor Beginn des Winters ausverkauft war, so dass keine weitere Ware mehr für die Deckung der gestiegenen Nachfrage bereit stand und auch kurzfristig nicht mehr beschafft werden konnte. Die Scheitholzproduktion sollte folglich durch Rationalisierung verbessert werden. Da es sich bei der Scheitholzbereitstellung um eine Verfahrenskette mit einer großen möglichen Anzahl von verschiedenen Teilverfahrensschritten handelt, sind viele Eingriffsmöglichkeiten und Optimierungsansätze denkbar. Die dafür erforderlichen Daten wie z. B. geeignete holzmengenspezifische Planungszahlen liegen für die Scheitholzproduktion derzeit nicht vor. Für eine Weiterentwicklung des Scheitholzmarktes sind somit zunächst eine Vielzahl von Kenntnislücken zu schließen und geeignete belastbare Planungszahlen zu erarbeiten. Mit dem hier durchgeführten Forschungsprojekt soll hierzu ein Beitrag geleistet werden. Das Fehlen solcher systematisch erarbeiteter Daten belegt, dass die Bedeutung des Scheitholzes für die Bioenergienutzung jahrelang unterschätzt wurde.

In den umfangreich durchgeführten Studien im Bereich der Holzernte JD und der Scheitholzbereitstellung hat sich die Methode mit PDA und Software zur Zeitaufnahme in Verbindung mit dem PC und der Software zur Vor- und Nachbereitung der Zeitstudien bewährt. So lässt sich die Konfiguration eines individuellen Erhebungsschemas am PC erstellen. Sowohl die dadurch vereinfachte Erhebung als auch die einfache Datenübernahme in statistische Auswertungsprogramme führten zu einer rationalisierteren Arbeitsweise bei der Aufnahme von Zeitstudien. So wurde zum ersten Mal eine Zeitstudie einer Selbstwerber-Holzernte bei der Jungdurchforstung durchgeführt, da dies wegen der zu erwartenden Unterschiede zur professionellen Holzernte für eine aussagekräftige ökonomische Bewertung im Bereich Brennholzproduktion notwendig erschien. Mit 0,56 Fm/h pro Person liegt die technische Arbeitsproduktivität der Selbstwerber im Privatwald gegen die Erwartung leicht über den Werten, die im Bereich Brennholz im Einheitsortentarif (EST) angegeben werden. Im Einzelnen gab es aber große Unterschiede bei der technischen Arbeitsproduktivität, die aus den unterschiedlichen Leistungsvermögen der einzelnen Probanden, der verschiedenen Holzernte-Verfahren und unterschiedlichen Arbeitsbedingungen in den einzelnen Beständen resultierten.

Um der großen Vielfalt der Teilverfahrensschritte bei der Scheitholzbereitstellung gerecht zu werden, wurden viele unterschiedliche Geräte in 32 Zeitstudien für die Bereitstellung von Scheitholz untersucht. Da typische Werte aus der Praxis ermittelt werden sollten, wurden die Untersuchungen bei Brennholzhändlern durchgeführt. So sind Aussagen über die typischen Sortimente der Brennholzherstellung möglich. Da auch der optimale Durchmesser verschiedener Produktionsmethoden ermittelt wurde, wird ersichtlich, dass die tatsächliche Rundlingstärke meist unter dem Optimum liegt und damit die erreichten Leistungen oft nicht an die Herstellerangaben heranreichen. Dies betrifft vor allem die kombinierten Säge-Spaltmaschinen, bei denen der tatsächliche mittlere Durchmesser des Ausgangsmaterials (15,2 cm bei kleinen und 25,89 cm bei den großen)

weit unter den idealen Durchmessern liegt (jeweils maximal möglicher Durchmesser also von 30 cm bis 65 cm bei den untersuchten Geräten). Dennoch sinkt mit dem zunehmenden Grad an Mechanisierung der Zeitaufwand zur Verarbeitung des Holzes von 2,33 h/Fm (kleiner Senkrechtpalter) auf 0,17 h/Fm (große kombinierte Säge-Spaltmaschinen).

Das Messen der körperlichen Belastung am Arbeitsplatz ohne auf den Probanden einen Einfluss zu nehmen stellt hohe Anforderungen an die Messmethode. Mit einer Überprüfung der Methode nach OWAS konnte auch für den Bereich der Holzernte und Scheitholzbereitstellung eine Methode zur Messung der Belastungen für die Arbeit gefunden werden, die sich schon im Einsatz verschiedener Arbeiten z. B. in der Stahlindustrie bewährt hatte. Ein Belastungsindex gibt die Höhe der Belastung an, der für den Bereich der Scheitholzbereitstellung in Kategorien der Umgangssprache eingeordnet werden konnte. Aus den Untersuchungen wird ersichtlich, dass der Grad der Belastung mit zunehmender Mechanisierung stark von $L=179$ (umgangssprachlich „eher belastend“) beim Spalten mit der Axt auf $L=109$ (umgangssprachlich „kaum belastend“) beim Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine abnimmt, wodurch auch aus Sicht der Arbeitsbelastung zu einer Rationalisierung durch eine hohe Mechanisierung, in diesem Fall durch kombinierte Säge-Spaltmaschinen, geraten werden muss.

Die Methode der Energieverbrauchsmessung wurde, wo es möglich war, in bewährter Weise durch Messung des Kraftstoffs beziehungsweise des Stromverbrauchs während der Untersuchungen der Zeitstudien durchgeführt. Die Ergebnisse reichen von 1,80 kWh/Fm beim Spalten mit dem kleinen Senkrechtpalter bis 5,53 kWh/Fm beim Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine, was nach der Umrechnung der Kosten den Energieverbrauch mit insgesamt geringen spezifischen Kosten auszeichnete. Bei den Geräten, bei denen einmal der Verbrauch des Kraftstoffes und dann auch der Stromverbrauch gemessen werden konnte, hob sich der Antrieb durch Strom durch sehr viel geringere Energiekosten im Vergleich zu einem Verbrennungsmotor hervor, so dass betriebswirtschaftlich zu elektrischen Antrieben geraten werden muss.

Um den Anforderungen an eine saubere und effiziente Verbrennung genüge zu leisten, fordern die Hersteller von Holzverbrennungsanlagen einen Wassergehalt des Holzes von 20% und darunter. Bisher waren Lagerzeiten für Nadelholz von einem Jahr und für Laubholz von zwei bis drei Jahren üblich. Durch das monatliche Messen des Gewichtes verzurrter Rundholzbündel an verschiedenen Lagerorten, konnten die Verläufe der Wassergehalte veranschaulicht werden. Da die klimatischen Verhältnisse der Jahre nicht immer einheitlich sind, musste der Versuch im folgenden Jahr fortgeführt und zusätzlich frisches Holz für eine neue Messreihe eingelagert werden. Wie dieser über zwei Jahre andauernde Versuch mit verschiedenen Baumarten zeigt, waren die Unterschiede im Trocknungsverlauf in den verschiedenen Jahren sowie der verschiedenen Lagerorte (Freising, Kempten) unterschiedlichen Klimas gering. So erreichte meterlanges, gespaltenes Buchenscheitholz, das im Dezember waldfrisch mit einem Wassergehalt von $w=45\%$ eingelagert wurde, schon im Monat Juni, also nach sieben Monaten, das Ziel eines Wassergehalts von $w=20\%$ und fiel bis zum Monat September auf ca. $w=16\%$, worauf es in den Wintermonaten wieder bis auf $w=19\%$ anstieg. Folglich ist eine Lagerdauer bei frisch geerntetem und sofort gespaltenem Scheitholz von einem Jahr ausreichend. Kürzere Lagerzeiten sind besonders bei kürzerem und in Gitterboxen geschüttet gelagertem Holz möglich, wobei sich die Lagerzeit aber immer mindestens über die

komplette Sommerperiode (von April bis einschließlich August) erstrecken sollte. Eine Unterscheidung der untersuchten Baumarten Buche, Fichte und Kiefer ist dabei nicht nötig.

Trotz eines hohen Messaufwandes bei der Bestimmung des Anfangs- und Endwassergehalts des Holzes, der für die Bestimmung der Trockenmasse notwendig ist, führt die Methode auf Grund der großen Streuung der Wassergehalte der einzelnen Scheite, besonders des Anfangwassergehalts, nur zu einer Annäherung an den tatsächlichen Wert. Mit 5% Trockenmasseverluste bei der Lagerung von Scheitholz an einem gut durchlüfteten Lagerstandort ist der Verlust bei einer zweijährigen Lagerung vernachlässigbar. Da eine Lagerdauer von einem Jahr ausreichend ist, dürften dabei die Trockenmasseverluste noch geringer ausfallen.

Da unterschiedliche Methoden beim Messen von Raummetern vorgefunden wurden und die eigene Messmethode wissenschaftlichen Ansprüchen, d. h. vor allem der Messgenauigkeit und der Wiederholbarkeit genügen musste und zugleich auch der Verwendung in der Praxis Nahe kommen sollte, zusätzlich sämtliche Sortimenten wie langes und kurzes Holz, geschichtet und geschüttet messbar sein mussten, wurde ein Messverfahren mit einem eigens entworfenen Messrahmen definiert, in dem diese Messungen in großer Zahl durchgeführt werden konnten. Es zeigte sich, dass zwischen den einzelnen Schichtholzsortimenten nennenswerte Unterschiede bestehen, die in einer Tabelle aufgeführt wurden. Diese bewirken, dass ein Brennholzkunde, der sich vom Verkäufer einen Raummeter gespaltenes Meterholz ofenfertig aufbereiten lässt, bei der Anlieferung als 33-er Kurzscheite nur noch 0,81 Rm (Buche) bzw. noch 0,86 Rm (Fichte) erhält. Diese Ergebnisse zeigen, dass die pauschale Anwendung eines einheitlichen Umrechnungsfaktors von Massivholz zu Schichtholz nicht sinnvoll ist. Insbesondere der in der Praxis bekannte und in verschiedenen Quellen immer wieder genannte Umrechnungsfaktor von 1,43 (d.h. 1 Fm entspricht 1,43 Rm Schichtholz) sollte durch Verwendung differenzierterer Werte abgelöst werden, zumal sich dieser pauschale Wert selbst für die relativ dichtlagernden ofenfertigen Kurzscheite als erkennbar zu niedrig herausgestellt hat und ursprünglich nur als statistischer Wert eingesetzt werden sollte, da er den tatsächlichen Gehalt an Holzmasse nur ungenau widerspiegelt (vgl. KNIGGE, SCHULZ [32]).

Mit der Bildung von vier beispielgebenden Prozessketten von Freizeit-Selbstwerbern über Waldbauern bis hin zum professionellen Scheitholzgewerbe in sogenannten Pfaden wurde versucht, der Vielfalt der unterschiedlichen Scheitholzbereitungsverfahren durch einer Bewertung der Verarbeitungsdauer, der Arbeitsschwere, des Energieverbrauchs und der Gesamtkosten gerecht zu werden. Die Pfade wurden so gewählt, dass sich jeder interessierte Produzent von Scheitholz annähernd in einem der Pfade wiederfindet und gegebenenfalls durch geringfügiges Ändern beim Zusammensetzen der einzelnen Arbeitsablaufabschnitte seine eigenen Produktionskosten abschätzen kann. Allgemein wird bei den Pfaden 1 bis 4 deutlich, dass bei zunehmendem Grad der Rationalisierung, geringere spezifische Kosten anfallen. Mit den eigens ermittelten derzeitigen durchschnittlichen Scheitholzpreisen für ofenfertiges Scheitholz in Deutschland (z. B. 33 cm Scheite Buche von 63,50 €/Rm vgl. [29]) ist es mit allen aufgeführten Varianten möglich einen Gewinn zu erwirtschaften, da sich die Gesamtkosten auf 54,72 €/Rm (Pfad 1) bzw. 31,53 €/Rm (Pfad 3) belaufen.

8 Abstract

Wood logs are still the most important bioenergy source in Germany. None the less each year in winter there is a lack of ovenready wood logs for domestic wood furnaces. This means that the preparation of wood logs has to be improved by rationalisation of workflow. To do so there is a need of getting scientific numbers of the preparation of splitted wood logs and further the storage of wood logs. But there are no scientific numbers available yet. To receive these numbers this study includes time studies of different existing workflows of harvesting and preparation of wood logs with the energy input, trials of the different ways of storage, the determination of the dry matter loss of wood logs while the storage, measurements of the work intensity while harvesting and the preparation of woodlogs and the converting volumes. With these results one is able to combine the numbers in order to get the economic evaluation of four paths with different ways of the preparation of splitted wood logs.

Time studies

40 time studies of harvesting wood in young forest stands (typically harvested to be processed into splitted wood logs) and the process of splitting wood logs were done to get data about a variety of already existing work flows. The method of time studies with the help of personal digital assistance devices (PDA) as e. g. a palm™ and a special software (umt™ and statumt™) for analysing data with a personel computer was successfully installed to accomplish these agricultural and forestal demands. Numbers of different work flows e. g. with an axe, vertical and horizontal splitters, wood log saws, combined saw splitters are given to evaluate different paths of the preparation of wood logs.

Work intensity

With the OWAS-method one is able to get plausible data of the work intensity of the preparation of wood logs, by analysing the postures especially by regarding the arms, the body and the legs of a working person. All 30 seconds one evaluates the working posture and get an index for the part of investigation between 100 (low working load) and 400 (heavy workload). The method was improved by using a digital camcorder to take pictures in different intervalls and analyse it at the pc to reduce failure because there was no time pressure while the evaluation of the postures (in this case the postures seen on the photos) and the possibility of an action replay. As expected the results show an improvement of the work intensitiy by increasing of the grade of rationalisation of the work flow. In order to help anyone to understand the work load faktor (100 to 400) it was translated into a common understandable language (very low intensitiy to very high intensity).

Storage

For application in domestic wood furnaces a suitable drying stage below 20% moisture content is highly important for an undisturbed and clean combustion. This stage is usually achieved by conventional (passive) drying during storage. Such storage can however be organised in many ways and under various climatic conditions and there is a high uncertainty in practise about the minimum storage time requirement. Furthermore, there is only little knowledge about the usual dry matter losses during this storage period. The here presented research aimed at giving differentiated answers to these questions. Drying takes place during long term storage and it was the aim of

the here presented research to determine the minimum storage time requirement under several storage conditions. A total of 37 m³ of stapled wood logs (round an split wood, beech and spruce) were arranged in storage stacks, both outdoors (covered and uncovered) and indoors. The wood was stored as bundles and monthly weighed over two years. Depending on climate, pre-treatment (splitting) and storage type (covered/uncovered/indoors) an oven-ready target moisture of below 20% was reached in less than nine months. This applied for freshly harvested wood which was stored during winter. Major differences between beech, pine and spruce wood did not occur. A maximum monthly moisture loss was consistently given in March (over 90 l/m³). Unsplit wood logs require slightly longer drying time. Coverage of outdoor piles was favourable until early summer when drying speed picked up for uncovered piles and compensated the delay. Dry matter losses during storage were in the order of 4% over the full 24 month period (average for all wood types and treatments).

Dry matter loss

The dry matter losses over such a period are negligible, particularly when the storage time is shorter than two years. However, the determination of dry matter loss is a difficult task due to the high variation of moisture content in the freshly harvested wood. Even at a relatively high measuring effort only rough estimates for the total losses over two years are possible. Further differentiations for wood species or treatments are hardly possible.

Converting volumes

The factors for converting volumes of equal masses of various wood log assortments were determined through numerous staking and pouring trials using a standard measuring frame. The results show clear differences between the staked assortments (unsplit and split, 33-cm logs). For loose wood logs an influence of the wood type was also observed. The previous global conversion factors are highly questioned.

Keywords: time studies, Biomass characteristics, wood logs, biomass storage, drying, dry matter losses, wood logs, staked cubic metre, conversion factor

9 Literaturverzeichnis

- [1] ANONYMUS (1936): HOMA, Holzmessanweisung, Bestimmungen über die Ausformung, Messung und Sortenbildung des Holzes in den deutschen Forsten; Berlin
- [2] ANONYMUS (2004): Gut gelaufen!. Brennstoffspiegel und Mineralölrundschau: deutsches Energiemagazin, Heft 2, S. 35-37
- [3] ANONYMUS (2005): in Wikipedia, die freie Enzyklopädie
<http://de.wikipedia.org/wiki/Hauptseite>
- [4] ANONYMUS (2006): AFZ - Der Wald. Jg. 61, Heft 1 (2.1. 2006) ff., Rubrik „Holzmarkt“
- [5] ANONYMUS (2006): Vorfahrt für einheimische Festbrennstoffe. Brennstoffspiegel und Mineralölrundschau, Heft 2, S. 44-45
- [6] BAYERISCHE LANDESANSTALT FÜR LANDWIRTSCHAFT (2006): Wetterdaten des Agrarmeteorologischen Messnetz Bayern
- [7] BAYERISCHER WALDBESITZERVERBAND E.V. (1996): Broschüre "Bayerisch Heizen – Anschriften bayerischer Brennholzdepots". Agnes-Bernauer Str. 88, 80687 München.
- [8] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1983): Rohholzsortierungsbestimmungen für den Gebrauch im bayerischen Staatswald. München, 33 S.
- [9] BAYERISCHES STAATSMINISTERIUM FÜR LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (2004): Land- und Forstwirtschaft in Bayern. Daten und Fakten 2004. München
- [10] BRUSCHE, R. (1983): Hackschnitzel aus Schwachholz. KTBL Schrift 290, Landwirtschaftsverlag, Münster
- [11] BUNDESMINISTERIUM FÜR ERNÄHRUNG, LANDWIRTSCHAFT UND FORSTEN (1983): Schreiben des Bundesministers für Ernährung Landwirtschaft und Forsten vom 20.09.1983 - 613-7164/4. Zitiert in: Rohholzsortierungsbestimmungen für den Gebrauch im bayerischen Staatswald. Bayer. Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.), Ohne Datum
- [12] BUNDESVERBAND DES DEUTSCHEN GÜTERNAHVERKEHRS E.V. (BDN) (1995): Kostenorientierte unverbindliche Richtpreis-Tabellen. Frankfurt/Main, 1995, 32 S.
- [13] CENTRALES AGRAR-ROHSTOFF-MARKETING- UND ENTWICKLUNGSNETZWERK (C.A.R.M.E.N. e.V.) Preisinformationen, Webseite: <http://www.carmen-ev.de>
- [14] DECKER T. (2004): Beurteilung der Arbeitsbelastung bei der Scheitholzbereitstellung mit Hilfe der OWAS-Methode, Diplomarbeit; TU-München Weihenstephan, Lehrstuhl für Landtechnik
- [15] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1993): DIN EN 322: Holzwerkstoffe, Bestimmung des Feuchtegehalts; Beuth Verlag
- [16] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG (1994): DIN EN 350-2, Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz, Beuth-Verlag

- [17] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG prCEN TS 14961: Feste Biobrennstoffe – Brennstoffspezifikationen und -klassen. Deutsches Institut für Normung (Hrsg.), Beuth Verlag, Berlin, 42 S.
- [18] FLINTEC GMBH (2002) Betriebsanleitung Wägezelle Flintec UB6 bzw. Hottinger Baldwin U2-2t. Meckesheim: Flintec, Darmstadt: HBM
- [19] FREI, D. (1996): Analyse und Bewertung von Körperhaltungen bei der Forstarbeit mit Hilfe der OWAS-Methode; Diplomarbeit Trzesniowski, Wien: Universität für Bodenkultur, Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen.
- [20] HARTMANN, H. (2003): Brennstoffeigenschaften und Mengenplanung. In: Hartmann, H. (Hrsg.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Sonderpublikation der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, S. 51-60.
- [21] HARTMANN, H. (2003): Kosten der Festbrennstoffnutzung. In: Hartmann, H. (Hrsg.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Sonderpublikation der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, S. 127-137
- [22] HARTMANN, H. (Hrsg.) (2003): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Sonderpublikation des Bundesministeriums für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft (BMVEL) und der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow, , 184 S.
- [23] HARTMANN, H.; BÖHM, T. (2004): Physikalisch-mechanische Brennstoffeigenschaften. In: Härtlein, M.; Eltrop, L.; Thrän, D (Hrsg.): Voraussetzung zur Standardisierung biogener Festbrennstoffe, Teil 2: Mess- und Analyseverfahren. Schriftenreihe Nachwachsende Rohstoffe (23), Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (Hrsg.), Landwirtschaftsverlag, Münster, S. 558-632)
- [24] HARTMANN, H.; BÖHM, T.; MAIER, L. (2000): Naturbelassene biogene Festbrennstoffe – Umweltrelevante Eigenschaften und Einflussmöglichkeiten. Bayerisches Staatsministerium für Landesentwicklung und Umweltfragen (Hrsg.), München, Reihe "Materialien", Nr. 154, 155 S.
- [25] HARTMANN, H.; HÖLDRICH, A. (2003): Bereitstellung von Festbrennstoffen. In: Hartmann, H. (Hrsg.): Handbuch Bioenergie-Kleinanlagen. Sonderpublikation der Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe (FNR), Gülzow
- [26] HARTMANN, H.; MADEKER, U. (1997): Der Handel mit biogenen Festbrennstoffen – Anbieter, Absatzmengen, Qualitäten, Service, Preise. Landtechnik Bericht Nr. 28, Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.), Selbstverlag, Freising
- [27] HARTMANN, H.; THUNEKE, K. (1997): Ernte von Kurzumtriebsplantagen - Maschinenerprobung und Modellbetrachtungen. Landtechnik Bericht 29, Selbstverlag Landtechnik Weihenstephan (Hrsg.), Freising, 98 S.
- [28] HILDEBRANDT R. (Hrsg.) (1969): Die Schnittholztrocknung, Oberboihingen
- [29] HÖLDRICH, A.; REISINGER, K.; HARTMANN, H. (2006) Erhebung eines Scheitholzpreises in Rationelle Scheitholzbereitstellung; TFZ Bericht Nr. 11, Straubing
- [30] HOLZABSATZFONDS (2005):, Natürlich HOLZ. Die deutsche Forstwirtschaft - Zahlen und Fakten, Bonn
- [31] JACKE (2003): Vorgabe-, Richt- und Planzeiten: Zur abschließenden Nutzung des Erweiterten Sortentarifs (EST), Forst und Holz 58 Jahrgang

- [32] KNIGGE, W.; SCHULZ H. (1966): Grundriss der Forstbenutzung; Parey Verlag S. 284
- [33] KOLLMANN, F. (1982): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. Band 1, 2. Auflage, Springer Verlag, Berlin, S. 99, S. 111
- [34] KRAMER, H.; AKÇA, A. (1995): Leitfaden zur Waldmesslehre, J.D. Sauerländer's Verlag Frankfurt am Main, 3. Auflage
- [35] KROTTENTHALER, F. (2003): Umrechnungszahlen vom Rundholz zum Holzschliff, Diplomarbeit; Studienfakultät Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement, TU München Weihenstephan
- [36] KTBL – Persönliche Mitteilung aus dem Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL), Darmstadt
- [37] KTBL Taschenbuch (2005): Faustzahlen für die Landwirtschaft, 13. Auflage
- [38] KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN IN DER LANDWIRTSCHAFT E.V. (2005): Faustzahlen für die Landwirtschaft (KTBL) (Hrsg.), Darmstadt. Redaktion: Werner Achilles et al., 13. Aufl. Münster : KTBL-Schr.-Vertrieb im Landwirtschaftsverl
- [39] LANDAU, K. (1998): im REFA-Fachauschuß Forstwirtschaft (Hrsg.) Arbeitsstudien, Arbeitsorganisation und Qualitätsmanagement in der Forstwirtschaft, 1. Auflage; Stuttgart I-FAO
- [40] LÖFFLER, H. (1992): Skriptum: Arbeitswissenschaft. Fakultät für Forstwissenschaften und Ressourcenmanagement, Weihenstephan
- [41] LOHMANN, U. (1993): Handbuch Holz , DRW-Verlag, Stuttgart, 4. Auflage
- [42] LUNDQVIST, P. (1988): Working Environment in Farm Buildings - Results of Studies in Livestock Buildings and Greenhouses. Dissertation. Uppsala: Swedish University of Agricultural Sciences, Department of Farm Buildings. ISBN 91-576-3372-X
- [43] LWF Bericht Nr. 28 (2003): Bereitstellungsverfahren für Waldhackschnitzel - Leistung, Kosten, Rahmenbedingungen. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (Hrsg.), Freising, Selbstverlag
- [44] LWK (2001): Energie aus Holz – Informationsbroschüre der Landwirtschaftskammern (Autoren: Jonas, A. und Haneder H.), Niederösterreichische Landes-Landwirtschaftskammer (Hrsg.), St. Pölten, 8. überarbeitete Auflage, 76 S.
- [45] MALL, M. (2003): Verfahren zur Bereitstellung von Scheitholz; Diplomarbeit an der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement der TU München Weihenstephan
- [46] MOMBÄCHER, R. (1993): Holzlexikon DRW-Verlag Stuttgart, 1. Nachdruck, 3. Auflage, A – M, S. 633
- [47] MÖRSCHNER, J.; MARHEINEKE, T.; ELTROP, L. (2002): Ökologische Analyse (I) – Lebenszyklusbetrachtungen. In: Hartmann, H.; Kaltschmitt, M. (Hrsg.): Biomasse als erneuerbarer Energieträger – Eine technische, ökologische und ökonomische Analyse im Kontext der übrigen Erneuerbaren Energien. Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe", Band 3 (2. Auflage, Neubearbeitung), Landwirtschaftsverlag Münster, S. 255-352
- [48] ÖKO INSTITUT DARMSTADT (Hrsg.) (2005), Globales Emissions-Modell Integrierter Systeme (GEMIS), Version 4.3. Basisdatenauszug auf Anfrage (Stand 05/2005). Web: www.gemis.de

- [49] ÖSTERREICHISCHES NORMUNGSINSTITUT (Hrsg.) (1998): ÖNORM M7132 (Energiewirtschaftliche Nutzung von Holz und Rinde als Brennstoff - Begriffsbestimmungen und brennstofftechnologischer Merkmale); Eigenverlag, Wien
- [50] PAUSCH, R. (2003): Zeitbedarf, Produktivität, Kraftstoffverbrauch und Kosten von Holzernetechnik, Kalkulationsgrundlagen. in: Felbermeier, B.; Mosandl, R. (ed.) (2004): Zukunftsorientierte Forstwirtschaft: Entwicklung eines forstlichen Entscheidungsunterstützungssystems (ZEUS) auf der Grundlage von Untersuchungen verschiedener Waldbehandlungsoptionen in Forstbetrieben Mittelschwabens; Ökosystem Management 1, 180 S. Technische Universität München. Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement.
- [51] PETERS, H.; (1991): Ergonomische und sicherheitstechnische Bewertung von Holzernetechniken in der Forstwirtschaft – an Beispielen aus Staats- und Kleinprivatwald. Dissertation. München: Ludwig-Maximilians-Universität, Forstwissenschaftliche Fakultät.
- [52] PRODAN, M. (1951); Messung der Waldbestände; J.D. Sauerländer's Verlag S. 8
- [53] SCHAFFNER, S. (2001): Realisierung von Holzvorräten im Kleinprivatwald – Dissertation am Lehrstuhl für Forstpolitik und Forstgeschichte an der Studienfakultät für Forstwissenschaft und Ressourcenmanagement am Wissenschaftszentrum für Ernährung, Landnutzung und Umwelt, TU München Weihenstephan, S. 243
- [54] STAMPFER, K. (1996): Belastungs- und Beanspruchungsermittlung in verschiedenen mechanisierten forstlichen Arbeitssystemen. Dissertation. Trzesniowski, Wien: Universität für Bodenkultur, Institut für Forsttechnik.
- [55] STOFFERT, G. (1985): Analyse und Einstufung von Körperhaltungen bei der Arbeit nach der OWAS-Methode in Gesellschaft für Arbeitswissenschaft e.V. Zeitschrift für Arbeitswissenschaft 39, 1/85.
- [56] TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY – Occupational Safety Engineering. P.O. Box 541, FIN-33101 Tampere, Finland
- [57] Tecson 2005: Der aktuelle Heizölpreis. Internet: <http://www.tecson.de/pheizoel.htm>.
- [58] VEREIN ZUR FÖRDERUNG VON MAßNAHMEN FÜR FEUERSICHERHEIT UND UMWELTSCHUTZ DES SCHORNSTEINFEGERHANDWERKS E.V. (Hrsg.): Erste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes – Verordnung über Kleinfeuerungsanlagen, 1.BImSchV (kommentierte Fassung). Essen (ohne Datum); 116 S.
- [59] WENDL, G. (1992): Reparaturkosten von Landmaschinen. Rationalisierungskuratorium für Landwirtschaft (RKL), Kiel, Selbstverlag, S. 1496-1521.
- [60] WITTKOPF, S. (2005): Bereitstellung von Hackgut zur thermischen Verwertung durch Forstbetriebe in Bayern. Dissertation, TU München, Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt
- [61] ZIMMER ELECTRONIC SYSTEMS (2001); Handbuch Energiemessgerät TM 39 von ZES

10 Anhang

10.1 Arbeitsablaufabschnitte und Beschreibungen der einzelnen Zeitstudien

Arbeitsablaufabschnitte Holzernte

- *Rüsten.* Unter Rüsten versteht man zum einen die Arbeiten, die zu Beginn des Arbeitstages notwendig sind, um die eigentliche Arbeit beginnen zu können, und zum anderen die Tätigkeiten, die beim Abschluss eines Arbeitstages nötig sind. Im Einzelnen sind dies z. B. das Betanken der Motorsäge und der Transport des benötigten Werkzeugs an den Bestand sowie der Abtransport der Geräte zum Fahrzeug am Arbeitsende.
- *PVZ.* Die persönlich bedingte Verteilzeit vereinheitlicht die Zeiten, in denen sich ein Arbeiter nicht der eigentlichen Arbeit widmet. Das ist z. B. ein Gespräch mit dem Kollegen, eine kurze Raucherpause, Austreten, Ablegen von Kleidungsstücken etc. Eine längere Pause (z. B. Mittagspause) wird unter PVZ nicht erfasst.
- *SVZ.* Die sachlich bedingte Verteilzeit beinhaltet Zeiten, die für die Wartung des Gerätes während der eigentlichen Arbeitszeit, also nicht während des Rüstens, anfällt. Hierunter fällt beispielsweise das Schärfen der Kette, das Nachtanken etc.
- *Sonstige Zeiten.* Dahinter verbergen sich unvorhersehbare Tätigkeiten wie z. B. Fragen, Anweisungen und Erläuterungen vom Zeitnehmer.
- *Gehen (Baum aufsuchen).* Der Ablaufabschnitt „Gehen“ bezieht sich auf den Zeitraum vom Ende des Ablängens (Ende des Sägevorgangs) bis zum Beginn des Freischneidens (Ansetzen der Säge) oder – falls nicht freigeschnitten wird – des Fällens. Darüber hinaus wurden aber auch unregelmäßig auftretende Laufwege, z. B. Heranholen eines vergessenen Werkzeugs dem „Gehen“ zugeordnet.
- *Freischneiden.* Beim Freischneiden befreit man den zu fällenden Baum von Ästen, die bei der Fällarbeit stören. Zusätzlich wird dabei der Arbeitsraum, der für die Fällarbeit benötigt wird von Gestrüpp befreit.
- *Fällen (und zu Fall bringen).* Das Fällen beginnt mit dem Ansetzen der Motorsäge zum Fällschnitt. Der daran anschließende Abschnitt beginnt, wenn der Baum gefällt am Boden liegt.
- *Asten/Ablängen.* Da diese Arbeiten oft ineinander übergehen, wurden sie hier zu einem Ablaufabschnitt zusammengefasst. Beim Entasten werden die Äste vom Baumstamm abgetrennt und anschließend in 1-m- bzw. 2-m-Rollen abgelängt. Dieser Abschnitt beginnt beim Einhängen des Rollmaßbandes am Baumstamm oder, falls kein Maßband verwendet wurde, beim Absägen des ersten Astes.
- *Vorliefern.* Beim Vorliefern werden die Meterstücke aus dem Bestand zu den Abfuhrstellen getragen. Dieser Ablaufabschnitt beginnt mit der Aufnahme des ersten Meter- bzw. Zwei-Meter-Stücks.
- *Seilarbeit.* In einzelnen Arbeitsstudien wurde beim Fällen bzw. beim Vorliefern Seilwinden eingesetzt. Die dazu gehörenden Einzeltätigkeiten (Schlepper positionieren, Seilauszug etc.) wurden unter dem Abschnitt "Seilarbeit" zusammengefasst.

Arbeitsstudie 1, Holzernte Fichte

Aufnahmedatum	04./05./09. März 2004
Wuchsgebiet	Wuchsbezirk 13.2 „Münchner Schotterebene“, Isar-Auwald Raum Freising
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 75% Fichte, 25% Esche Alter: 25 – 50 Jahre Nutzungs-/Durchforstungsart: Jungdurchforstung (JD)
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 11,22 cm Mittlerer MDM: 8,81 cm Mittleres Rohschafvolumen: 0,0649 Fm m.R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 8,8 m
Behinderungen	Bewuchs: keine Behinderung auf 95% der Fläche, 5% mit behinderndem Bewuchs Gelände: keine Behinderung auf 100% der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 0% Witterung/Wettereinflüsse: keine Behinderung
Arbeitskräfte	Arbeiter: männlich, 30 Jahre, komplette Schutz- und Arbeitsausrüstung vorhanden
Maschinenausstattung	Motorsäge: Stihl 020; 1,6 kW
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung Vermessen mit Hilfe eines Rollmaßbandes Ablängen auf 1-Meter-Stücke, kein Spalten Vorlieferung bis zur Rückegasse, Abholung des Holzes erfolgt zu späterem Zeitpunkt

Arbeitsstudien 2 und 3, Holzernte Fichte

Aufnahmedatum	28. Februar 2004
Wuchsbezirk	Wuchsgebiet 13.2 „Münchner Schotterebene“, Isar-Auwald, Raum Freising
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 95% Fichte mit Laubholz-Unterstand, 5% Laubholz Alter: 40 Jahre Nutzungs-/Durchforstungsart: Jungdurchforstung (JD), partiell Altdurchforstung (AD)
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: Arbeitsstudie 2: 11,21 cm, Arbeitsstudie 3: 12,83 cm Mittlerer MDM: Arbeitsstudie 2: 8,64 cm, Arbeitsstudie 3: 10,45 cm Mittleres Rohschafvolumen (in Fm m. R.): Arbeitsstudie 2: 0,0821, Arbeitsstudie 3: 0,1384
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 10 – 15 m
Behinderungen	Bewuchs: keine Behinderung auf 100% der Fläche Gelände: keine Behinderung auf 100% der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 0% Witterung/Wettereinflüsse: behindernder Schnee im Kronenraum und auf dem Boden Temperatur: -10 °C
Arbeitskräfte	Arbeiter Studie 2: männlich, 31 Jahre, komplette Schutz-/Arbeitsausrüstung vorhanden Arbeiter Studie 3: männlich, 41 Jahre, komplette Schutz-/Arbeitsausrüstung vorhanden
Maschinenausstattung	Schlepper mit Seilwinde (MB-Truc) Motorsäge Arbeiter 1: Stihl 026 Motorsäge Arbeiter 2: Stihl 026
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung durch beide Arbeiter getrennt voneinander Vermessen mit Hilfe eines Rollmaßbandes Ablängen auf 2-Meter-Stücke, kein Spalten Vorlieferung bis zur Rückegasse

Arbeitsstudie 4, Holzernte Fichte

Aufnahmedatum	07. Februar 2004
Wuchsgebiet	Wuchsbezirk 12.7 „Mittelschwäbisches Schotterriedel- und Hügelland“, Landkreis Neu-Ulm
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 95% Fichte, 5% Laubholz Nutzungs-/Durchforstungsart: JD
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 9,75 cm Mittlerer MDM: 8 cm Mittleres Rohschaftholumen: 0,0464 Fm m.R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 15 m Vorlieferentfernung: 50 – 55 m
Behinderungen	Bewuchs: keine Behinderung auf 100% der Fläche Gelände: keine Behinderung auf 100% der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 0% Witterung/Wettereinflüsse: keine Behinderung
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, 35 Jahre mit kompletter Schutzausrüstung
Maschinenausstattung	Hobby-Entastungssäge (< 3 kW) Pkw mit Anhänger
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung Ablängen auf 2,5-Meter-Stücke, kein Spalten Vorlieferung bis zum Pkw-befahrbaren Waldweg, Abholung des Holzes erfolgt zu späterem Zeitpunkt

Arbeitsstudie 5, Holzernte Kiefer

Aufnahmedatum	20. Dezember 2003
Wuchsgebiet	Wuchsbezirk 13.2 „Münchner Schotterebene“, Isar-Auwald, Raum Freising
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 90% Kiefer, 10% Laubholz, einzelne Fichte Alter: 25 – 30 Jahre Nutzungs-/Durchforstungsart: JD
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 10,28 cm Mittlerer MDM: 8,33 cm Mittleres Rohschaftholumen: 0,0439 Fm m.R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 10 – 15 m
Behinderungen	Bewuchs: dichter, behindernder Bewuchs über mannshoch bis 3 m auf 100% der Fläche Gelände: keine Behinderung auf 100% der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 0% Witterung/Wettereinflüsse: keine Behinderung
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, 57 Jahre, MS-Führer, komplette Schutz-/Arbeitsausrüstung vorhanden Arbeiter 2: männlich, 58 Jahre, Mithilfe beim Ablängen sowie Vorliefern und Beladen
Maschinenausstattung	Motorsäge Stihl 026 Jeep mit Seilwinde und Anhänger
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung Ablängen auf 1-Meter-Stücke, kein Spalten Vorlieferung bis zur Rückegasse, eine Teilmenge wurde auf einen kleinen Autoanhänger verladen Zufallbringen z. T. mit Unterstützung der Seilwinde

Arbeitsstudie 6, Holzernte Kiefer

Aufnahmedatum	20. Dezember 2003
Wuchsgebiet	Wuchsbezirk 13.2 „Münchner Schotterebene“, Isar-Auwald, Raum Freising
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 70% Kiefer, 20% Fichte, 10% Laubholz Nutzungs-/Durchforstungsart: JD
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 6,96 cm Mittlerer MDM: 5,46 cm Mittleres Rohschaftvolumen: 0,0243 Fm m.R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 10 m
Behinderungen	Bewuchs: dichter, behindernder Bewuchs knie- bis mannshoch auf 20% der Fläche (Schlinggewächse), dichter behindernder Bewuchs über mannshoch bis 3m auf 50% der Fläche (Schlinggewächse), dichter, behindernder Unterstand auf 15% der Fläche Gelände: keine Behinderung auf 100% der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 0% Witterung/Wettereinflüsse: keine Behinderung
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, 65 Jahre, MS-Führer, Schutz-/Arbeitsausrüstung vorhanden, aber Helm ohne Visier und Gehörschutz Arbeiter 2: männlich, 40 Jahre, Vorliefern, keine Schutz-/Arbeitsausrüstung, nur Schnittschutzstiefel Arbeiter 3: weiblich, 75 Jahre, Vorliefern, keine Schutz-/Arbeitsausrüstung
Maschinenausstattung	Traktor mit Anhänger, MS Stihl 026
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung Ablängen auf 2-Meter-Stücke (Fluchtstab als Maßeinheit), kein Spalten Vorliefern zur Rückegasse, anschließendes Aufladen auf Anhänger

Arbeitsstudie 7 Holzernte Ahorn, Buche

Aufnahmedatum	05./06. Januar 2005
Wuchsgebiet	Wuchsbezirk 6.5 „Oberpfälzer Jurarand“, Raum Regensburg
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 60% Bergahorn, 40% Buche Alter: 45 Jahre Nutzungs-/Durchforstungsart: JD teilweise Übergang zur AD
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 16,61 cm Mittlerer MDM: 13,43 cm Mittleres Rohschaftvolumen: 0,21 Fm m.R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 30 m
Behinderungen	Bewuchs: keine Behinderung auf 100% der Fläche Gelände: keine Behinderung auf 100% der Fläche Durchschnittliche Hangneigung: 11%, partiell deutlich höher Witterung/Wettereinflüsse: regnerisch, Nässe führt zu erhöhter Rutschgefahr in den Hangpartien
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, 50 Jahre, MS-Führer, komplette Schutz-/Arbeitsausrüstung vorhanden Arbeiter 2: männlich, 20 Jahre, Vorliefern, keine Schutz-/Arbeitsausrüstung, nur Schnittschutzstiefel
Maschinenausstattung	Motorsäge: Stihl 036
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung Kein Ablängen der Bäume im Hangbereich, Bäume werden zu einem späteren Zeitpunkt aus dem Hang geseilt und an der Forststraße abgelängt Vorliefern des Astmaterials bis zur Forststraße Zusammentragen des Reisigmaterials auf Haufen

Arbeitsstudie 8, Holzernte Esche	
Aufnahmedatum	21.02.2004
Wuchsgebiet	Wuchsbezirk 13.2 „Münchner Schotterebene“, Isar-Auwald Raum Freising
Bestandesbeschreibung	Baumarten: 75% Esche, 25% Erle, Ahorn im Unterstand Alter: 40 – 80 Jahre (Eschen), 30 – 40 Jahre (Erlen) Nutzungs-/Durchforstungsart: AD partiell VJ
Kenndaten	Ausscheidender Bestand Mittlerer BHD: 22,3 cm Mittlerer MDM: 16,65 cm Mittleres Rohschafsvolumen: 0,44 Fm m.R.
Erschließung	Mittlere Entfernung zur Rückegasse: 25 m
Behinderungen	Bewuchs: keine Behinderung auf 100% der Fläche Gelände: keine Behinderung auf 65% der Fläche, 35% der Fläche durch Gräben durchgezogen Durchschnittliche Hangneigung: 0% Witterung/Wettereinflüsse: keine Behinderung
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, 31 Jahre, komplette Schutz-/Arbeits-ausrüstung vorhanden Arbeiter 2: männlich, 41 Jahre, komplette Schutz-/Arbeits-ausrüstung vorhanden
Maschinenausstattung	Schlepper mit Seilwinde (MB-Truck) Motorsäge Arbeiter 1: Stihl 035 Motorsäge Arbeiter 2: Stihl 035
Arbeitsverfahren	Motormanuelle Fällung und Entastung durch beide Arbeiter getrennt voneinander dabei Vermessen mit Hilfe eines Rollmaßbandes Ablängen auf 1-Meter-Stücke, kein Spalten Vorlieferung bis zur Rückegasse, Abholung des Holzes erfolgt zu späterem Zeitpunkt Herausseilen der Stämme aus dem Inneren des Bestandes bzw. der Stämme aus dem Bereich der Gräben bis zur Rückegasse und anschließende Aufarbeitung (1-Meter-Stücke, ungespalten)

Ablaufabschnitte Spalten mit der Axt

- *Rüsten.* Beim Spalten mit der Axt oder mit dem Spalthammer umfasst das Rüsten den Transport der Axt zum Hackstock, das Vorbereiten des Arbeitsplatzes und das Platzieren der Lagerbehälter.
- *PVZ.* Persönliche Verteilzeit.
- *SVZ.* Die sachlich bedingte Verteilzeit, die auch als "maschinelle Verteilzeit" bezeichnet wird, war hier wegen der reinen Handarbeit nicht aufzunehmen.
- *Holz holen.* Das Holz vom Lagerhaufen holen. Dieser Abschnitt beginnt mit dem Gang zum Haufen und endet mit der Ablage des Scheites auf dem Hackklotz.
- *Durchmesser ermitteln.* Für Messungen mit Spalthammer war es durchweg erforderlich, dass der Arbeiter den Durchmesser des Rundholzes für die Volumenbestimmung bestimmte. Dieser Arbeitsablaufabschnitt wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Er beginnt mit dem Griff zur Kluppe (Messgerät). Bei Messungen an bereits gespaltenen Scheiten (weitere Zerkleinerung) war eine solche Volumenbestimmung wegen der unregelmäßigen Form nicht möglich. Hier wurde das Holzvolumen nicht für jeden Zyklus individuell, sondern für die gesamte Dauer der Zeitstudie durch Schütt-Volumenbestimmung in den Gitterboxen festgestellt.
- *Holz spalten.* Das Spalten des Holzes mit der Axt. Dieser Arbeitsablaufabschnitt beginnt mit dem Griff zur Axt.
- *Holz ablegen.* Das Ablegen des Holzes beginnt mit dem Griff zu den Scheiten und beinhaltet den Wurf auf den Lagerhaufen oder in die Gitterbox.
- Außerdem wurden *Unterbrechungen*, die auftraten wenn z. B. die zeitnehmende Person Fragen an den Probanden hatte und *sonstige Zeiten* für Unvorhersehbares, das nicht auszuwerten wäre, festgehalten. Die Mittagspause wurde nicht separat erfasst bzw. als "Pause" gekennzeichnet und in den Auswertungen nicht berücksichtigt.

Ablaufabschnitte Spalten mit dem kleinen Senkrechtpalter

- *Rüsten.* Das Rüsten umfasst den Aufbau des Arbeitsplatzes bis zum Beginn des ersten Spaltens.
- *Holz holen.* Das Holz vom Lagerhaufen holen. Dieser Abschnitt beginnt mit dem Gang zum Haufen.
- *Durchmesser ermitteln.* Für Messungen mit dem kleinen Senkrechtpalter war es erforderlich, dass der Arbeiter den Durchmesser des Rundholzes für die Volumenbestimmung bestimmte. Dieser Arbeitsablaufabschnitt wurde bei der Auswertung nicht berücksichtigt. Er beginnt mit dem Griff zur Kluppe (Messgerät).
- *Holz zurechtrücken.* Damit der Spaltkeil an der richtigen Stelle spaltet, ist es notwendig, das Holz an die geeignete Stelle unter dem Spaltkeil zu platzieren.
- *Holz spalten.* Dieser Arbeitsablaufabschnitt beginnt mit dem Senken des Spaltkeils.
- *Holz ablegen.* Das Ablegen des Holzes beginnt mit dem Griff zu den gespaltenen Scheiten und beinhaltet den Wurf auf den Lagerhaufen oder in die Gitterbox.
- Hinzu kommt die Erfassung der persönlichen (*PVZ*) und sachlichen Verteilzeiten (*SVZ*). Außerdem wurden *Unterbrechungen* und *sonstige Zeiten* sowie gegebenenfalls die Mittagspause als "Pause" festgehalten.

Arbeitsstudie KS 1, Spalten mit dem kleinen Senkrechtpalter

Aufnahmedatum	23. April 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtpalter: Elektra Beckum 6 SD Spaltdruck: 6 t Elektrischer Antrieb: 3 kW
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 85 Mittlerer Mittendurchmesser: 13,38cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:02 Stunden Mittlere Zyklusdauer: 00:43,9 Mittlere Leistungsaufnahme: 0,53 kW
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 33 cm Lager: lose geschüttet liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose geschüttet liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Arbeitsstudie KS 2, Spalten mit dem kleinen Senkrechtpalter

Aufnahmedatum	23. April 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtpalter: Elektra Beckum SD 6 Spaltdruck: 6 t Elektrischer Antrieb: 3 kW
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 38 Mittlerer Mittendurchmesser: 13,73 cm Effektiv untersuchte Zeit: 00:51 Stunden Mittlere Zyklusdauer: 01:20,6 Mittlere Leistungsaufnahme: 0,53 kW
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 33 cm Lager: lose geschüttet liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose geschüttet liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Arbeitsstudie KS 3, Spalten mit dem kleinen Senkrechtpalter

Aufnahmedatum	27. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtpalter: Elektra Beckum SD 6 Spaltdruck: 6 t Elektrischer Antrieb: 3 kW
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 152 Mittlerer Mittendurchmesser: 11,93 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:12 Stunden Mittlere Zyklusdauer: 00:28,4 Mittlere Leistungsaufnahme: 0,68 kW
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 33 cm Lager: lose geschüttet liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose geschüttet liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Arbeitsstudie KS 4, Spalten mit dem kleinen Senkrechtpalter

Aufnahmedatum	27. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtpalter: Elektra Beckum SD 6 Spaltdruck: 6 t Elektrischer Antrieb: 3 kW
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 128 Mittlerer Mittendurchmesser: 12,94 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:04 Stunden Mittlere Zyklusdauer: 00:30,4 Mittlere Leistungsaufnahme: 0,63 kW
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 33 cm Lager: lose geschüttet liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose geschüttet liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Arbeitsstudie KS 5, Spalten mit dem kleinen Senkrechtpalter

Aufnahmedatum	28. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtpalter: Elektra Beckum SD 6 Spaltdruck: 6 t Elektrischer Antrieb: 3 kW
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 182 Mittlerer Mittendurchmesser: 11,45 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:43 Stunden Mittlere Zyklusdauer: 00:33,9 Mittlere Leistungsaufnahme: 0,70 kW
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 33 cm Lager: lose geschüttet liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose geschüttet liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Arbeitsstudie KS 6, Spalten mit dem kleinen Senkrechtpalter

Aufnahmedatum	28. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtpalter: Elektra Beckum SD 6 Spaltdruck: 6 t Elektrischer Antrieb: 3 kW
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 166 Mittlerer Mittendurchmesser: 11,45 cm Effektiv untersuchte Zeit: 00:59 Stunden Mittlere Zyklusdauer: 00:21,4 Mittlere Leistungsaufnahme: 0,72 kW
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 33 cm Lager: lose geschüttet liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose geschüttet liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Arbeitsablaufabschnitte Spalten mit dem großen Senkrechtpalter

- *Rüsten.* Das Rüsten umfasst den Aufbau des Arbeitsplatzes bis zum Beginn des ersten Spaltens.
- *Holz holen.* Das Holz vom Lagerhaufen holen. Dieser Abschnitt beginnt mit dem Gang vom Spalter zum Haufen oder Stapel. Wenn ein zweiter Arbeiter das Holz schon geholt hat, beinhaltet Holz holen nur das Greifen nach dem Holz. Der Vorgang endet mit dem Ablegen des Holzes unter dem Spaltkeil. Für den Teilnehmer öffnete sich während dieses Vorgangs auf dem Eingabedisplay seines PDA ein Nummerfeld, in dem er die laufende Rundholznummer vermerkte.
- *Holz zurechtrücken.* Damit der Spaltkeil an der richtigen Stelle spaltet, ist es notwendig, das Holz an die geeignete Stelle unter dem Spaltkeil zurechtzurücken. (Wird zur Zykluszeit hinzuaddiert, muss aber nicht bei jedem Zyklus auftreten)
- *Holz spalten.* Das Spalten des Holzes mit dem Spalter. Dieser Arbeitsablaufabschnitt beginnt mit dem Herabfahren des Spaltkeils.
- *Holz ablegen.* Das Ablegen des Holzes beginnt mit dem Griff zu den Scheiten und beinhaltet den Wurf auf den Lagerhaufen oder in die Gitterbox.
- *Spalter versetzen.* Der Schlepper, an dem der Spalter angebracht ist, wird um ein paar Meter versetzt, um wieder einen optimalen Abstand zum Rundholzvorrat oder zur Ablage herzustellen.
- Hinzu kommt die Erfassung der persönlichen (*PVZ*) und sachlichen Verteilzeiten (*SVZ*), die in Kapitel 4.1.3.1 definiert werden. Außerdem wurden *Unterbrechungen* und *sonstige Zeiten* sowie ggf. die Mittagspause als "*Pause*" festgehalten.

Arbeitsstudie GS 1, Spalten mit dem großen Senkrechtpalter

Aufnahmedatum	25. November 2003
Standort	Versuchshofgut Dürnast bei Freising
Gerätetyp	Senkrechtpalter: Edora mit Spaltkreuz (vier Enden) Spaltdruck: 16 t Zapfwellenantrieb Schlepper: Fendt 308 LSA 57 kW (78 PS)
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 162 Mittlerer Mittendurchmesser: 17,01 cm Effektiv untersuchte Zeit: 02:20 Stunden Energieverbrauch: 2,4 l/h Dieselkraftstoff
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 1 Meter Lager: gestapelt liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: gestapelt liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Arbeitsstudie GS 2, Spalten mit dem großen Senkrechtpalter

Aufnahmedatum	24. November 2003
Standort	Versuchshofgut Dürnast bei Freising
Gerätetyp	Senkrechtpalter: Edora mit Spaltkreuz (vier Enden) Spaltdruck: 16 t Zapfwellenantrieb Schlepper: Fendt 308 LSA 57 kW (78 PS)
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 119 Mittlerer Mittendurchmesser: 18,76 cm Effektiv untersuchte Zeit: 02:19 Stunden Energieverbrauch: 2,4 l/h Dieselkraftstoff
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Diplom Forstwirt Alter: 28 Jahre Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 1 Meter Lager: gestapelt liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: gestapelt liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Arbeitsstudie GS 3, Spalten mit dem großen Senkrechtpalter

Aufnahmedatum	14. Mai 2004
Standort	Landwirtschaftlicher Betrieb in Pönning
Gerätetyp	Senkrechtpalter: Vogesenblitz Spaltdruck: 25 t Extra: Hat eine Variable Haltekralle zum Fixieren der Rundlinge Zapfwellenantrieb Schlepper: MF 294 S, 55 kW (75 PS)
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 167 Mittlerer Mittendurchmesser: 18,31 cm Effektiv untersuchte Zeit: 02:36 Stunden Energieverbrauch: 1,72 l/h Dieselkraftstoff
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Student Agrarwissenschaft, Landwirt Alter: 24 Jahre Größe: 1,65 m
Arbeitsverfahren	Spalten des Rundholzes mit der Länge 1 Meter Lager: lose liegende Rundlinge ca. 2 m Entfernung Ablage: lose liegendes gespaltenes Holz ca. 2 m Entfernung

Arbeitsstudie GS 4, Spalten mit dem großen Senkrechtpalter

Aufnahmedatum	13. April 2004
Standort	Forststraße (Wald in Freising)
Gerätetyp	Senkrechtpalter: Edora Spaltdruck: 12 t Zapfwellenantrieb Schlepper: Steyr
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 123 Mittlerer Mittendurchmesser: 20,38 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:42 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Forstarbeiter, Alter: 45 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich, Forstarbeiter, Alter 55 Jahre, Größe 1,73 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: Spaltet das Rundholz mit der Länge 1 Meter, holt es dabei vom Lager, welches gestapelt liegende Rundlinge in ca. 2 m Entfernung der Forststraße enthält und legt das gespaltene Holz in unmittelbarer Nähe ab. Arbeiter 2: nimmt das lose liegende Holz und stapelt es auf einem Anhänger, trägt hin und wieder entfernter liegende Rundlinge bei.

Arbeitsstudie GS 5, Spalten mit dem großen Senkrechtpalter

Aufnahmedatum	14. April 2004
Standort	Forststraße (Wald in Freising)
Gerätetyp	Senkrechtpalter: Edora Spaltdruck: 12 t Zapfwellenantrieb Schlepper: Steyr
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 168 Mittlerer Mittendurchmesser: 25,81 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:12 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Forstarbeiter, Alter: 45 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich, Forstarbeiter, Alter 55 Jahre, Größe 1,73 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: Spaltet das Rundholz mit der Länge 1 Meter, holt es dabei vom Lager, welches gestapelt liegende Rundlinge in ca. 1 m Entfernung der Forststraße enthält und legt das gespaltene Holz in unmittelbarer Nähe ab. Arbeiter 2: nimmt das lose liegende Holz und stapelt es auf einem Anhänger, trägt hin und wieder entfernter liegende Rundlinge bei.

Arbeitsstudie GS 6, Spalten mit dem großen Senkrechtpalter

Aufnahmedatum	26. April 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Senkrechtpalter: Edora Spaltdruck: 12 t Elektrischer Antrieb der Hydraulik: 4 kW
Kenndaten	Baumart: gemischt Anzahl Rundlinge: 280 Effektiv untersuchte Zeit: 02:21 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Forstarbeiter, Alter: 45 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich 55, Größe 1,73 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: Spaltet das Rundholz mit der Länge 1 Meter, holt es dabei vom Lager, welches gestapelt liegende Rundlinge in ca. 1 m Entfernung enthält und legt das gespaltene Holz in unmittelbarer Nähe ab. Arbeiter 2: nimmt das lose liegende Holz und stapelt es, trägt hin und wieder entfernter liegende Rundlinge bei.

Arbeitsablaufabschnitte Spalten mit dem großen Waagrechtpalter

- *Rüsten.* Das Rüsten umfasst den Aufbau des Arbeitsplatzes bis zum Beginn des ersten Spaltens.
- *Beladen.* Das Holz vom Lagerhaufen holen. Dieser Abschnitt beginnt mit dem Gang zum Haufen oder Stapel.
- *Holz zurechtrücken.* Das Holz gerade in die Wanne zurechtrücken, damit es optimal zum Stempel zugeführt wird. (Wird zur Zykluszeit hinzuaddiert, muss aber nicht bei jedem Zyklus auftreten)
- *Stempelvorschub.* Das Spalten des Holzes mit dem Spalter. Dieser Arbeitsablaufabschnitt beginnt mit dem Vorschub des Stempels. Für den Zeitnehmer öffnete sich auf dem Eingabedisplay seines PDA ein Nummerfeld, in dem er die laufende Rundholznummer vermerkte.
- *Kreuz korrigieren.* Das Spaltkreuz wird in der Höhe variiert, um die Kreuzmitte der Rundholzmitte anzugleichen.
- *Spalter versetzen.* Der Schlepper, an dem der Spalter angebracht ist, wird um ein paar Meter versetzt, um wieder einen optimalen Abstand zum Lager oder der Ablage herzustellen.
- Hinzu kommt die Erfassung der persönlichen (PVZ) und sachlichen Verteilzeiten (SVZ), die in Kapitel 4.1.3.1 definiert werden. Außerdem wurden *Unterbrechungen* und *sonstige Zeiten* sowie ggf. die Mittagspause als "Pause" festgehalten.

Arbeitsstudie WS 1, Spalten mit dem großen Waagrechtpalter

Aufnahmedatum	16. April 2003
Standort	Landwirtschaftlicher Betrieb in Scheyern
Gerätetyp	Waagrechtpalter: BGU SP 30 HZH Spaltdruck: 30 t Antrieb über Zapfwelle, Schlepper 68 PS Energieverbrauch: 1,21 l/h Dieselkraftstoff
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 225 Mittlerer Mittendurchmesser: Effektiv untersuchte Zeit: 01:59 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Landwirt, Alter: 65 Jahre, Größe: 1,68 m Arbeiter 2: männlich Landwirt, Alter: 24 Jahre, Größe: 1,78 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: Spaltet das Rundholz mit der Länge 1 Meter, holt es dabei vom Lager, welches lose liegende Rundlinge in ca. 1 m Entfernung enthält. Lässt das Holz hinten einfach fallen und muss daher den Schlepper mit dem Spalter zweimal versetzen. Arbeiter 2: führt entfernter liegende Rundlinge bei. Räumt hin- und wieder die Ablagefläche hinter dem Spaltkreuz frei

Arbeitsstudie WS 2, Spalten mit dem großen Waagrechtspalter

Aufnahmedatum	04. Juni 2003
Standort	Landwirtschaftlicher Betrieb in Scheuern
Gerätetyp	Waagrechtspalter: BGU SP 30 HZH Spaltdruck: 30 t Antrieb über Zapfwelle, Schlepper 50 kW (68 PS)
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 142 Mittlerer Mittendurchmesser: Effektiv untersuchte Zeit: 01:15 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Landwirt, Alter: 26 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich Landwirt, Alter: 24 Jahre, Größe: 1,78 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: Spaltet das Rundholz mit der Länge 1 Meter, holt es dabei vom Lager, welches lose liegende Rundlinge in ca. 1 m Entfernung enthält. Lässt das Holz hinten einfach fallen und muss daher den Schlepper mit dem Spalter zweimal versetzen. Arbeiter 2: führt entfernter liegende Rundlinge bei. Räumt hin- und wieder die Ablagefläche hinter dem Spaltkreuz frei

Arbeitsstudie WS 3, Spalten mit dem großen Waagrechtspalter

Aufnahmedatum	17. April 2004
Standort	Landwirtschaftlicher Betrieb in Nandlstadt
Gerätetyp	Waagrechtspalter: POSCH Hydro-Max Spaltdruck: 24 t Antrieb über Zapfwelle, Schlepper: Schlüter 1250
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 142 Mittlerer Mittendurchmesser: Effektiv untersuchte Zeit: 02:30 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Landwirt, Alter: 53 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich, Landwirt, Alter: 24 Jahre, Größe: 1,78 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: Spaltet das Rundholz mit der Länge 1 Meter, holt es dabei vom Lager, welches lose liegende Rundlinge in ca. 1 m Entfernung enthält und lässt das gespaltene Holz in eine Auffangwanne fallen. Arbeiter 2: nimmt das lose liegende Holz aus der Wanne und stapelt es, trägt entfernter liegende Rundlinge bei und verkürzt so den Weg vom Lager zum Spalter.

Arbeitsablaufabschnitte Sägen und Spalten mit der kleinen kombinierten Säge-Spaltmaschine

- *Rüsten.* Das Rüsten umfasst den Aufbau des Arbeitsplatzes bis zum Beginn des ersten Spaltens.
- *Beladen.* Hierunter ist das Beladen der Zuführvorrichtung der kombinierten Säge-Spaltmaschine mit Rundholz zu verstehen.
- *Gitterbox wechseln.* Ein voller Lagerbehälter wird gegen einen leeren ausgetauscht (Gitterbox oder Anhänger).
- *Fördern.* Zu diesem Zeitpunkt wurde das Rundholz manuell auf das Förderband gerollt und vorgefahren bis zum Anschlag an der Säge. Für den Zeitnehmer öffnete sich auf dem Eingabedisplay seines PDA ein Nummerfeld, in dem er die laufende Rundholznummer vermerkte.
- *Vorschub.* Sobald das Rundholz an den Anschlag gefahren ist beginnt der Vorschub. Er beträgt hier 33 cm und endet mit dem Beginn des Sägens.
- *Sägen.* Das Sägen beginnt mit der Bewegung des Sägeschwertes (oder dem Sägeblatt) und endet wenn das Sägeschwert wieder in Ruheposition ist.
- Hinzu kommt die Erfassung der persönlichen (*PVZ*) und sachlichen Verteilzeiten (*SVZ*), die in Kapitel 4.1.3.1 definiert werden. Außerdem wurden *Unterbrechungen* und ggf. die Mittagspause als "Pause" sowie *sonstige Zeiten* festgehalten, womit z. B. das Hantieren am Stempel zum Lösen von Verkeilungen gemeint ist.

Arbeitsstudie KK 1, Sägen und Spalten mit der kleinen komb. Sägespaltmaschine

Aufnahmedatum	20. Februar 2004
Standort	Betriebsgelände Aufarbeitungsplatz
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: Hakki Pilke 2x easy Spaltdruck: 58 kN Installierte Motornennleistung: 7,5 kW Max. Durchmesser: 30 cm Säge: Kettensägeschwert 13“ Schnittlänge: bis 60 cm Angabe Hersteller Produktivität: 10 – 12 Rm/h Gemessene mittlere TAP hier : 4,0 Rm/h
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 71 Mittlerer Mittendurchmesser: 14,65 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:55 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Zimmermann Alter: 28 Jahre, Größe: 1,87 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Er befördert dabei das Rundholz vom Lagergestell auf das Förderband, bedient Vorschub und Sägen. Das Gerät spaltet und befördert dann automatisch das 33 cm lange und gespaltene Holz in Gitterboxen. Sind die Gitterboxen voll, so werden diese vom Arbeiter mit Hilfe eines Gabelstaplers gegen leere ausgetauscht. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge mit Hilfe eines Baggers mit einer Klemmzange auf das Vorratsgestell beim Förderband. (Geht nicht in die Bewertung mit ein.)

Arbeitsstudie KK 2, Sägen und Spalten mit der kleinen komb. Sägespaltmaschine

Aufnahmedatum	2003 (nach Mall; eigene Auswertung)
Standort	Betriebsgelände Aufarbeitungsplatz
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: Hakki Pilke 2x easy Spaltdruck: 58 kN Installierte Motornennleistung: 7,5 kW Max. Durchmesser: 30 cm Säge: Kettensägeschwert 13“ Schnittlänge: bis 60 cm Angabe Hersteller Produktivität: 10 – 12 Rm/h Gemessene mittlere TAP hier : 8,2 Rm/h
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Rundlinge: 61 Mittlerer Mittendurchmesser: 17,44 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:16 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Arbeiter Alter: 50 Jahre, Größe: 1,75 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Er befördert dabei das Rundholz vom Lagergestell auf das Förderband, bedient Vorschub und Sägen. Das Gerät spaltet und befördert dann automatisch das 33 cm lange und gespaltene Holz in Gitterboxen. Sind die Gitterboxen voll, so werden diese vom Arbeiter mit Hilfe eines Gabelstaplers gegen leere ausgetauscht. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge mit Hilfe eines Baggers mit einer Klemmzange auf das Vorratsgestell beim Förderband. (Geht nicht in die Bewertung mit ein.)

Arbeitsstudie KK 3, Sägen und Spalten mit der kleinen komb. Sägespaltmaschine

Aufnahmedatum	12. August 2003
Standort	Forststraße im Auwald bei Freising
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: Posch Spaltfix 300 Spaltdruck: 11 t Antrieb über Zapfwelle Schlepper Max. Durchmesser: 28 cm Säge: Kreissägeblatt Durchmesser 750 mm Schnittlänge: 20 cm bis 50 cm
Kenndaten	Baumart: Esche Anzahl Rundlinge: 83 Mittlerer Mittendurchmesser: 17,73 cm Effektiv untersuchte Zeit: 02:16 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Landwirt, Alter: 53 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich, Arbeiter, Alter: 55 Jahre, Größe 1,73 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Er fördert dabei das Rundholz bis zum Anschlag und bedient dann Vorschub und Sägen. Das Gerät spaltet und befördert dann automatisch das 33 cm lange und gespaltene Holz auf einen Anhänger. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge bei und legt sie auf das Förderband. Bewegt den Anhänger für ein gleichmäßiges Befüllen.

Arbeitsstudie KK 4, Sägen und Spalten mit der kleinen komb. Sägespaltmaschine

Aufnahmedatum	12. August 2003
Standort	Forststraße im Auwald bei Freising
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: Posch Spaltfix 300 Spaltdruck: 11 t Antrieb über Zapfwelle Schlepper Max. Durchmesser: 28 cm Säge: Kreissägeblatt Durchmesser 750 mm Schnittlänge: 20 cm bis 50 cm
Kenndaten	Baumart: Esche Anzahl Rundlinge: 72 Mittlerer Mittendurchmesser: 14,86 cm Effektiv untersuchte Zeit: 01:12 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1: männlich, Landwirt, Alter: 53 Jahre, Größe: 1,75 m Arbeiter 2: männlich, Arbeiter, Alter: 55 Jahre, Größe 1,73 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Er fördert dabei das Rundholz bis zum Anschlag und bedient dann Vorschub und Sägen. Das Gerät spaltet und befördert dann automatisch das 33 cm lange und gespaltene Holz auf einen Anhänger. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge bei und legt sie auf das Förderband. Bewegt den Anhänger für ein gleichmäßiges Befüllen.

Arbeitsstudie KK 5, Sägen und Spalten mit der kleinen komb. Sägespaltmaschine

Aufnahmedatum	2003 (Nach Mall; eigene Auswertung)
Standort	Aufarbeitungsplatz im Wald bei Freising
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: PALAX Combi TSV E Kraftübertragung über Zapfwelle eines Schleppers Max. Durchmesser: 25 cm Säge: Kreissägeblatt Durchmesser 700 mm Wipptisch Schnittlänge: 25 cm bis 60 cm
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 207 Mittlerer Mittendurchmesser: 11,19 cm Effektiv untersuchte Zeit: 02:05 Stunden
Arbeitskräfte	Eine Arbeiterin, weiblich, Größe: 1,70 m
Arbeitsverfahren	Die Arbeiterin sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Sie hebt die Rundlinge auf das Förderband von einem ca. 1m entfernten hoch liegenden Holzlager, fördert dann das Rundholz bis zum Anschlag und bedient weiter Vorschub und Sägen. Das Gerät spaltet und befördert dann automatisch das 33 cm lange und gespaltene Holz in ein Lagerbehälter.

Arbeitsstudie GK 1, Sägen und Spalten mit der großen komb. Sägespaltmaschine

Aufnahmedatum	19. Dezember 2003
Standort	Betriebsgelände Aufarbeitungsplatz (Biomassehof Allgäu)
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: Kretzer Herkules II Spaltdruck: 27 t Antrieb elektrisch 40 kW Max. Durchmesser: 45 cm Säge: Kettensäge Schnittlänge: 20 cm bis 50 cm
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 57 Mittlerer Mittendurchmesser: 24,98 cm Mittlere Rundlinglänge: 7,14 m Effektiv untersuchte Zeit: 02:59 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Alter: 43 Jahre, Größe: 1,76 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Alles automatisch, nur Kontrollfunktion, beheben von Störungen, wechseln der Gitterboxen. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge mit einem Bagger (Greifzange) bei und legt sie auf das Zuführgestell. Gelegentlich Hilfe beim Wechseln der Gitterbox. (Geht nicht in die Bewertung mit ein.)

Arbeitsstudie GK 2, Sägen und Spalten mit der großen komb. Sägespaltmaschine

Aufnahmedatum	2003 (Nach Mall; eigene Auswertung)
Standort	Betriebsgelände Aufarbeitungsplatz (Biomassehof Allgäu)
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: Kretzer Herkules II Spaltdruck: 27 t Antrieb elektrisch 40 kW Max. Durchmesser: 45 cm Säge: Kettensäge Schnittlänge: 20 cm bis 50 cm
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 79 Mittlerer Mittendurchmesser: 22,84 cm Mittlere Rundlinglänge: 7,03 m Effektiv untersuchte Zeit: 04:22 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Alter: 43 Jahre, Größe: 1,76 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Alles automatisch, nur Kontrollfunktion, beheben von Störungen, wechseln der Gitterboxen. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge mit einem Bagger (Greifzange) bei und legt sie auf das Zuführgestell. Gelegentlich Hilfe beim Wechseln der Gitterbox. (Geht nicht in die Bewertung mit ein.)

Arbeitsstudie GK 3, Sägen und Spalten mit der großen komb. Sägespaltmaschine

Aufnahmedatum	18. Mai 2004
Standort	Aufarbeitungsplatz Forstservice Haugg
Gerätetyp	Kombinierte Säge-Spaltmaschine: S&Ü SSA 650 Spaltdruck: 50 t Antrieb Dieselaggregat: Deutz F6L914 124 kW Max. Durchmesser: 65 cm Säge: Kettensäge 900 mm Schwertlänge Schnittlänge: 20 cm bis 65 cm Scheitlänge: 20 cm bis 1 m Verbrauch: 9,9 l/h; 2,03 l/Fm
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Rundlinge: 47 Mittlerer Mittendurchmesser: 29,85 cm Mittlere Rundlinglänge: 4,43 m Effektiv untersuchte Zeit: 03:10 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Alter: 35 Jahre, Größe: 1,85 m
Arbeitsverfahren	Arbeiter 1: sägt und spaltet das Rundholz durch Bedienen des kombinierten Säge-Spaltgerätes. Alles automatisch, nur Kontrollfunktion, beheben von Störungen. Arbeiter 2: bringt die Rundlinge mit einem Bagger (Greifzange) bei und legt sie auf das Zuführgestell. (Geht nicht in die Bewertung mit ein.)

Ablaufabschnitte Spalten mit der Wippkreissäge

- *Rüsten.* Das Rüsten umfasst den Aufbau des Arbeitsplatzes bis zum Beginn des ersten Sägens.
- *Holz holen.* Das Holz wird vom Lagerhaufen geholt. Der Arbeitsabschnitt beginnt mit dem Ende des Scheitablegens und endet mit dem Beginn des Sägens (Vorkippen mit der Wippe).
- *Holz sägen.* Der Abschnitt Sägen beginnt mit dem Vorkippen mit der Wippe und endet wenn das gesamte Scheit zersägt ist (das heißt ggf. auch mehrere Schnitte).
- *Holz ablegen.* Das Ablegen des Holzes beginnt, wenn die Wippe nach dem letzten Sägen in die Ausgangslage zurückgefallen ist und umfasst auch das Werfen des Holzes in den jeweiligen Behälter.
- *Gitterbox wechseln.* Dieser Abschnitt umfasst das Austauschen eines vollen gegen einen leeren Container oder Anhänger.
- Hinzu kommt die Erfassung der persönlichen (PVZ) und sachlichen Verteilzeiten (SVZ), die in Kapitel 4.1.3.1 definiert werden. Außerdem wurden *Unterbrechungen* und *sonstige Zeiten* sowie ggf. die Mittagspause als "Pause" festgehalten.

Arbeitsstudie KR 1, Sägen der Scheite mit der Wippkreissäge

Aufnahmedatum	19. September 2003
Standort	Landwirtschaftlicher Betrieb Haslauer Scheyern
Gerätetyp	Wippkreissäge: BGU WK 771 Durchmesser Sägeblatt: 700 mm Antrieb elektrisch: 5,2 kW Max. Durchmesser: 26 cm Verbrauch: 0,37 kWh/Rm
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Scheite: 677 Mittlerer Mittendurchmesser: gespalten Effektiv untersuchte Zeit: 02:26 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Alter: 28 Jahre, Größe: 1,78 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter sägt Fichten-Meterscheite auf 33 cm Länge. Er holt sie vom ca. 2 m entfernten Lager, bei dem die Scheite geschichtet sind und wirft die kurzen Scheite auf einen Anhänger.

Arbeitsstudie KR 2, Sägen der Rundlinge mit der Wippkreissäge

Aufnahmedatum	26. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Wippkreissäge: Elektra Beckum BW 750 Durchmesser Sägeblatt: 75 cm Antrieb elektrisch: 4,0 kW Max. Durchmesser: 30 cm Verbrauch: 0,66 kWh/Fm
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Scheite: 109 Mittlerer Mittendurchmesser: 11,72 Effektiv untersuchte Zeit: 00:46 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Alter: 30 Jahre, Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter sägt 1 m lange Fichten-Rundlinge auf 33 cm Länge. Er holt sie vom ca. 1 m entfernten Lager, bei dem die Rundlinge geschichtet sind und wirft die kurzen Rundlinge ungeordnet auf ein ca. 1 m entferntes Lager.

Arbeitsstudie KR 3, Sägen der Rundlinge mit der Wippkreissäge

Aufnahmedatum	26. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Wippkreissäge: Elektra Beckum BW 750 Durchmesser Sägeblatt: 75 cm Antrieb elektrisch: 4,0 kW Max. Durchmesser: 30 cm Verbrauch: 0,84 kWh/Fm
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Scheite: 94 Mittlerer Mittendurchmesser: 11,47 cm Effektiv untersuchte Zeit: 00:50 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Dipl. Forstwirt, Alter: 30 Jahre, Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter sägt 1 m lange Buchen-Rundlinge auf 33 cm Länge. Er holt sie vom ca. 1 m entfernten Lager, bei dem die Rundlinge geschichtet sind und wirft die kurzen Rundlinge ungeordnet auf ein ca. 1 m entferntes Lager.

Arbeitsstudie KR 4, Sägen der Rundlinge mit der Wippkreissäge

Aufnahmedatum	13. Mai 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Wippkreissäge: Elektra Beckum BW 750 Durchmesser Sägeblatt: 75 cm Antrieb elektrisch: 4,0 kW Max. Durchmesser: 30 cm Verbrauch: 0,30 kWh/Rm
Kenndaten	Baumart: Fichte Anzahl Scheite: 129 Mittlerer Mittendurchmesser: gespalten Effektiv untersuchte Zeit: 00:40 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Techniker, Alter: 33 Jahre, Größe: 1,85 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter sägt gespaltene 1 m lange Fichten-Scheite auf 33 cm Länge. Er holt sie vom ca. 1 m entfernten kreuzweise geschichteten Lager und lässt die 33 cm langen Scheite nach dem Sägen auf ein in unmittelbarer Nähe befindliches Förderband fallen, das die Scheite in eine Gitterbox befördert.

Arbeitsstudie KR 5, Sägen der Rundlinge mit der Wippkreissäge

Aufnahmedatum	13. Mai 2004
Standort	Betriebsgelände Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Wippkreissäge: Elektra Beckum BW 750 Durchmesser Sägeblatt: 75 cm Antrieb elektrisch: 4,0 kW Max. Durchmesser: 30 cm Verbrauch: 0,30 kWh/Rm
Kenndaten	Baumart: Buche Anzahl Scheite: 154 Mittlerer Mittendurchmesser: gespalten Effektiv untersuchte Zeit: 01:00 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter, männlich, Techniker Alter: 33 Jahre, Größe: 1,85 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter sägt gespaltene 1 m lange Buchen-Scheite auf 33 cm Länge. Er holt sie vom ca. 1 m entfernten kreuzweise geschichteten Lager und lässt die 33 cm langen Scheite nach dem Sägen auf ein in unmittelbarer Nähe befindliches Förderband fallen, das die Scheite in eine Gitterbox befördert.

Ablaufabschnitte Bündeln mit einer Bündelhilfe

- *Rüsten.* Das Rüsten umfasst den Aufbau des Arbeitsplatzes und das Zusammenbauen der Bündelhilfe bis zum Beginn des ersten Schichtens.
- *Stapeln.* Hierbei werden die Scheite in den Bündelrahmen gelegt. Der Abschnitt beginnt mit der Fertigstellung des Rahmens (Rüsten oder Ortswechsel).
- *Zurren.* Mit der Ratsche wird das Rundbündel zusammengezurt.
- *Schnüren.* Mit speziellem Garn wird das Bündel links und rechts verschnürt. Der Abschnitt endet mit dem Öffnen der Ratsche.
- *Kippen.* Das geschnürte Bündel wird aus der Bündelhilfe gekippt. Der Abschnitt beginnt mit dem Öffnen der Ratsche und endet, wenn das Bündel vom Podest entfernt wurde.
- *Versetzen.* Hier findet der Ortswechsel statt. Der Abschnitt endet, wenn der Rahmen zusammengesetzt und das Zurrband eingelegt ist (vor Beginn des Stapelns mit dem ersten Scheit).
- Hinzu kommt die Erfassung der persönlichen (PVZ) und sachlichen Verteilzeiten (SVZ), die in Kapitel 4.1.3.1 definiert werden. Außerdem wurden *Unterbrechungen* und *sonstige Zeiten* sowie ggf. die Mittagspause als "Pause" festgehalten.

Arbeitsstudie SC 1, Bündeln mit der Bündelhilfe

Aufnahmedatum	09. April 2003
Standort	Forschungshofgut Dürnast bei Freising
Gerätetyp	Bündelhilfe Woodpack 0,5 Rm
Kenndaten	Baumart: Buche und Fichte gemischt Effektiv untersuchte Zeit: 01:19:21 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1, männlich, Techniker, Alter: 28 Jahre, Größe: 1,78 m Arbeiter 2, männlich, Praktikant, Alter: 20 Jahre, Größe: 1,73 m
Arbeitsverfahren	Beide Arbeiter bündeln das 1 m lange Scheitholz mit einer einzelnen Bündelhilfe zu Rundbündel mit dem Inhalt 0,5 Rm. Dazu wird das Holz in den Rahmen der Bündelhilfe gestapelt. Danach werden die Scheite zusammengezurt und verschnürt. Anschließend werden die Bügel der Bündelhilfe geöffnet und das runde Holzbündel so zur Seite hin aus dem Gestell gekippt, dass es herausrollt. Danach wird die Bündelhilfe vor das nächste zu bündelnde Holz gestellt, die Bügel wieder verschlossen, um das nächste Bündel zu erstellen.

Arbeitsstudie SC 2, Bündeln mit der Bündelhilfe

Aufnahmedatum	07. Mai 2003
Standort	Lagerhalle der Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Bündelhilfe Woodpack 1 Rm
Kenndaten	Baumart: Buche und Fichte gemischt Effektiv untersuchte Zeit: 01:37:58 Stunden
Arbeitskräfte	Ein Arbeiter 1, männlich, Dipl. Forstwirt, Alter: 34 Jahre, Größe: 1,68 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter bündelt das 1 m lange Scheitholz mit der Bündelhilfe zu Rundbündel mit dem Inhalt 1 Rm. Dazu wird das Holz in den Rahmen der Bündelhilfe gestapelt. Danach werden die Scheite zusammengezurt und verschnürt. Anschließend werden die Bügel der Bündelhilfe geöffnet und das runde Holzbündel so zur Seite hin aus dem Gestell gekippt, dass es herausrollt. Danach wird die Bündelhilfe vor das nächste zu bündelnde Holz gestellt, die Bügel wieder verschlossen, um das nächste Bündel zu erstellen.

Arbeitsstudie SC 3, Holz schichten ohne Bündelhilfe

Aufnahmedatum	29. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände der Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Keiner; 33 cm lange Scheite ohne Bündelhilfe schichten
Kenndaten	Baumart: Buche und Fichte gemischt Effektiv untersuchte Zeit: 04:49:00 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1, männlich, Dipl. Forstwirt, Alter: 31 Jahre, Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter schichtet 33 cm Scheite ohne Bündelhilfe. Er holt die Scheite von einem ca. 1 m entfernt liegenden Lager, in dem die Scheite lose ca. 1 m hoch aufgehäuft liegen.

Arbeitsstudie SC 4, Holz in Lagerbehälter werfen

Aufnahmedatum	30. Oktober 2004
Standort	Betriebsgelände der Landtechnik Weihenstephan
Gerätetyp	Keiner; 33 cm lange Scheite in einen Lagerbehälter werfen. Der Lagerbehälter ist eine Gitterbox bestehend aus Baustahl auf einer Gitterbox. Die Höhe beträgt 2 m.
Kenndaten	Baumart: Buche und Fichte gemischt Effektiv untersuchte Zeit: 01:16:30 Stunden
Arbeitskräfte	Arbeiter 1, männlich, Dipl. Forstwirt, Alter: 31 Jahre, Größe: 1,81 m
Arbeitsverfahren	Der Arbeiter wirft 33 cm Scheite in den 2 m hohen Lagerbehälter. Er holt die Scheite von einem ca. 1 m entfernt liegenden Lager, in dem die Scheite lose ca. 1 m hoch aufgehäuft liegen

10.2 Fragebogen für die Selbstwerber im Staatswald bei Freising

1. Arbeiten Sie das Holz nur für den eigenen Bedarf auf?
 ja nur Verkauf/Nachbarhilfe teils/teils
2. Wenn ja, welche Feuerung versorgen Sie damit?
 Kaminofen Kachelofen Zentralheizung Heizungsherd
3. Welche Baumart(en) arbeiten Sie im Herbst/Winter 2003/04 als Selbstwerber im Staatswald mengenmäßig vorrangig auf? (Mehrfachnennung möglich)
 Fichte Buche Eiche Pappel Sonstige: _____
4. Was arbeiten Sie i. d. R. auf?
 Hiebsreste, Kronen, Käferholz im Bestand (Jung)Durchforstungen
 gerücktes Holz an der Waldstraße Sonstiges: _____
5. Auf welche Länge arbeiten Sie im Wald auf?
 1 m 50 cm 33 cm 25 cm Sonstige: _____
6. Welche Scheitlänge hat Ihr Endprodukt?:
 1 m 50 cm 33 cm 25 cm Sonstige: _____
7. Wie viel Raummeter Scheitholz machen Sie durchschnittlich pro Jahr?
ca. _____ Raummeter (Ster)
8. Wo setzen Sie das Holz zum Abtransport aus dem Wald auf?
 Bestand Rückegasse Waldstraße gar nicht
9. Wo spalten Sie das Holz verbrauchsfertig?
 Bestand Rückegasse Waldstraße Lagerplatz zu Hause gar nicht
10. Wo lagern Sie das Holz, um es verbrauchsfertig zu trocknen?
 Bestand Rückegasse Waldstraße Lagerplatz zu Hause gar nicht
11. Wie lange trocknen Sie das Holz insgesamt, bevor Sie es verfeuern?
Hartholz: 0,5 Jahre 1 Jahr 1,5 Jahre 2 Jahre mehr als 2 Jahre
Weichholz: 0,5 Jahre 1 Jahr 1,5 Jahre 2 Jahre mehr als 2 Jahre
12. Wie oft müssen Sie in den Wald, um die jährlich benötigte Brennholzmenge aufzuarbeiten?
 bis 2 mal 3-5 mal mehr als 5 mal

13. Seit wie viel Jahren arbeiten Sie im Wald Brennholz auf?
 1-2 Jahre 3-5 Jahre mehr als 5 Jahre
14. Wie viele Personen sind zusätzlich im Regelfall bei der Arbeit im Wald beteiligt?
 keine weiteren Personen 1 Person 2 Personen mehr als 2 Personen
15. Welche Maschinen verwenden Sie zur Aufarbeitung im Wald?
 Motorsäge Schlepper Seilwinde Sonstige: _____
16. Wie transportieren Sie das Holz aus dem Bestand an die Rückegasse?
 händisch mit Seil Sonstiges: _____
17. Wie transportieren sie das Holz an die Waldstraße?
 PKW+ Anhänger Schlepper+Anhänger Sonstiges: _____
18. Wie transportieren Sie das Holz an den Lagerplatz?
 PKW+ Anhänger Schlepper+Anhänger Sonstiges: _____
19. Welche Maschinen setzen Sie beim Spalten und Einteilen ein?
 Spalthammer Axt Spalter waagrecht Spalter senkrecht Kreissäge
 Kombinierte Säge-Spaltmaschinen Motorsäge Sonstige: _____
20. Wie hoch schätzen Sie Ihren durchschnittlichen Zeitbedarf, den Sie benötigen, damit 1 Ster Brennholz (1 m Länge) im Wald zum Abtransport bereit gestellt ist.
_____ h (Angabe in Gesamtarbeitsstunden)

Weitere freiwillige Angaben

Für das Projekt „Rationelle Scheitholzbereitstellung“ benötigen wir Personen, deren Arbeitsablauf wir mit einer Studie begleiten möchten. Falls Sie sich dazu bereit erklären würden, bitten wir um Ihren Namen und um Ihre Telefonnummer. Bei Angabe der Adresse werden Ihnen zusätzlich die Ergebnisse dieser Studie als Leitfaden zugesandt.

Name : _____

Telefon: _____

Adresse: _____

Vielen Dank für Ihre Mitarbeit !

10.3 Gewichte verschiedener Raummeterbündel

Tab. 44: Theoretische Werte für die Gewichte der Raummeterbündel^a

Fichten Raummeter aus gespaltenen Scheiten	254,61 kg
Buchen Raummeter aus gespaltenen Scheiten	383,18 kg
Kiefern Raummeter aus gespaltenen Scheiten	316,17 kg
Fichten Raummeter aus ungespaltenen Rundlingen	306,48 kg
Buchen Raummeter aus ungespaltenen Rundlingen	469,20 kg

^a (berechnet für 15% Wassergehalt bei folgenden Rohdichten: Fichte 0,41 g/cm³ Buche 0,68 g/cm³ Kiefer 0,51 g/cm³)

Tab. 45: Gemessene Gewichte der Raummeterbündel^b aus dem Lagerversuch

Baumart	Lagerort	Ausgangsform	Anzahl	Mittelwert Gewicht [kg]	Min [kg]	Max [kg]	Standardabweichung
Fichte	Freising	Scheite gespalten	10	314,97	298,09	333,68	12,93
Buche	Freising	Scheite gespalten	10	414,76	377,12	454,89	22,06
Kiefer	Freising	Scheite gespalten	6	325,33	304,69	341,89	13,33
Fichte	Freising	Rundlinge ungespalten	4	345,90	328,90	364,02	15,26
Buche	Freising	Rundlinge ungespalten	6	453,59	419,84	471,17	19,44
Fichte	Kempton	Scheite gespalten	6	245,96	235,68	252,28	6,71
Buche	Kempton	Scheite gespalten	6	368,89	357,60	380,88	9,20
Fichte	Freising erweitert	Scheite gespalten	8	242,66	232,44	263,19	9,42
Buche	Freising erweitert	Scheite gespalten	8	373,22	348,30	397,04	17,89
Buche	Kempton erweitert	Scheite gespalten	4	326,28	320,74	333,23	6,16

^b (umgerechnet auf 1 Rm mit 15% Wassergehalt)

10.4 Tabellen der Volumenbestimmungsergebnisse

Tab. 46: Variationskoeffizient (%) der Volumenmessungen

	VK (%) Buche	VK (%) Fichte
Festmeter	-	-
Rundlinge geschichtet	2,37	1,04
1 m gekreuzt geschichtet, gespalten	-	-
1 m geschichtet, gespalten	1,36	1,94
33 cm geschichtet, gespalten	0,79	0,79
33 cm geschüttet, Gitterbox	3,08	2,14
33 cm geschüttet, Messrahmen	1,03	1,51

Tab. 47: Ergebnis Volumenbestimmung Fichte (alle Volumina beziehen sich auf 1 Fm)

Fichte	April						Oktober					
	Mittelwert	Min	Max	Stabw	Anzahl	VK (%)	Mittelwert	Min	Max	Stabw	Anzahl	VK (%)
Festmeter	1	1	1	0	6	0	1	1	1	0	2	0
Rundlinge geschichtet	1,57	1,44	1,71	0,11	6	6,93	1,50	1,40	1,59	0,13	2	8,92
1 m gekreuzt geschichtet, gespalten	2,29	2,08	2,48	0,16	4	7,13	-	-	-	-	-	-
1 m geschichtet, gespalten	1,80	1,64	1,92	0,12	4	6,46	-	-	-	-	-	-
33 cm geschichtet, gespalten	1,52	1,45	1,60	0,10	4	6,84	1,54	1,51	1,56	0,03	2	2,11
33 cm geschüttet, Gitterbox	2,50	2,39	2,62	0,17	4	6,75	2,46	2,42	2,49	0,05	2	2,19
33 cm geschüttet, Messrahmen	2,39	2,24	2,53	0,21	4	8,63	2,56	2,52	2,61	0,06	2	2,35

Tab. 48: *Ergebnis Volumenbestimmung Buche (alle Volumina beziehen sich auf 1 Fm)*

Buche	April						Oktober					
	Mittelwert	Min	Max	Stabw	Anzahl	VK (%)	Mittelwert	Min	Max	Stabw	Anzahl	VK (%)
Festmeter	1	1	1	0	6	0	1	1	1	0	2	0
Rundlinge geschichtet	1,70	1,55	1,90	0,14	6	8,14	1,74	1,60	1,87	0,19	2	10,91
1 m gekreuzt geschichtet, gespalten	2,40	2,04	2,75	0,29	4	12,05	-	-	-	-	-	-
1 m geschichtet, gespalten	2,01	1,84	2,23	0,18	4	9,04	-	-	-	-	-	-
33 cm geschichtet, gespalten	1,60	1,46	1,74	0,20	4	12,53	1,63	1,52	1,75	0,16	2	9,75
33 cm geschüttet, Gitterbox	2,34	2,16	2,52	0,26	4	10,99	2,39	2,26	2,52	0,19	2	7,78
33 cm geschüttet, Messrahmen	2,24	2,07	2,41	0,24	4	10,83	2,53	2,40	2,67	0,194	2	7,67