

ARBEITSBERICHT

Institut für Ökonomie

Abschätzung des Rohholzpotentials für die energetische Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland

von

**Matthias Dieter und Hermann Englert
unter Mitarbeit von
Markus Klein**



**Bundesforschungsanstalt
für Forst- und Holzwirtschaft**

und die

Ordinariate für Holzbiologie,
Holztechnologie und Weltforstwirtschaft der

Universität Hamburg

Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft Hamburg
Hausadresse: Leuschnerstr. 91, 21031 Hamburg
Postadresse: 21027 Hamburg

Tel: 040 / 73962-301
Fax: 040 / 73962-317
Email: oekonomie@holz.uni-hamburg.de
Internet: <http://www.dainet.de/bfh>

Institut für Ökonomie

**Abschätzung des Rohholzpotentials für die energetische Nutzung
in der Bundesrepublik Deutschland**

von

**Matthias Dieter und Hermann Englert
unter Mitarbeit von
Markus Klein**

Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie 2001/11

Hamburg, Juli 2001

Inhaltsverzeichnis

	Seite
1	Einleitung 1
2	Material und Methoden..... 2
2.1	Abgrenzung und Quantifizierung der Biomassekomponenten eines Bestandes 2
2.1.1	Definition Biomasse..... 2
2.1.2	Potenzial an Biomasse zur thermischen Verwertung aus Waldholz 4
2.1.3	Quantitative Bestimmung der Biomassekomponenten 5
2.2	Bereitstellungsverfahren für Biomasse 8
2.2.1	Übersicht 8
2.2.2	Vollmechanisierte Waldhackschnitzel-Bereitstellung 8
2.2.3	Teilmechanisierte Waldhackschnitzel-Bereitstellung 10
2.2.4	Motormanuelle Waldhackschnitzel-Bereitstellung 12
2.2.5	Zuordnung der Verfahren zur Waldhackschnitzel-Bereitstellung 13
2.3	Datengrundlagen..... 14
2.3.1	Waldzustand und Waldentwicklung 14
2.3.2	Geoinformationen 17
3	Ergebnisse 21
4	Diskussion 28
5	Literatur 31
6	Anhang 34

Abkürzungsverzeichnis

Forstliche Begriffe

atro	absolut trocken
BHD	Brusthöhendurchmesser
HS	Hackschnitzel
m. R.	mit Rinde
o. R.	ohne Rinde
NV-Holz	nicht verwertetes Derbholz
X-Holz	bearbeitetes, nicht verwertetes Derbholz
Srm	Schüttraummeter
BWI	Bundeswaldinventur
DSWF	Datenspeicher Waldfonds
Alh	anderes Laubholz mit hoher Lebensdauer
Aln	anderes Laubholz mit niedriger Lebensdauer

Bundesländer

BB	Brandenburg
BE	Berlin
BW	Baden-Württemberg
BY	Bayern
HB	Bremen
HE	Hessen
HH	Hamburg
MV	Mecklenburg-Vorpommern
NI	Niedersachsen
NW	Nordrhein-Westfalen
RP	Rheinland-Pfalz
SH	Schleswig-Holstein
SL	Saarland
SN	Sachsen
ST	Sachsen-Anhalt
TH	Thüringen

Allgemeines

GAZ	Gesamtarbeitszeit
CORINE	<u>C</u> o- <u>o</u> rdinated <u>I</u> nformation of the <u>E</u> nvironment

Umrechnungsfaktoren

			t_{atro}	Srm	m^3
1 t_{atro}	Fichte	entspricht	1	5,8	2,3
	Kiefer	entspricht	1	4,9	2,0
	Buche	entspricht	1	3,7	1,5
	Eiche	entspricht	1	3,8	1,5
1 Srm	Fichte	entspricht	0,17	1	0,4
	Kiefer	entspricht	0,20	1	0,4
	Buche	entspricht	0,27	1	0,4
	Eiche	entspricht	0,26	1	0,4
1 m^3	Fichte	entspricht	0,43	2,5	1
	Kiefer	entspricht	0,51	2,5	1
	Buche	entspricht	0,68	2,5	1
	Eiche	entspricht	0,65	2,5	1

1 Einleitung

Mit dem „Erneuerbare-Energien-Gesetz“ (EEG) hat die Bundesregierung einen Anreiz zum vermehrten Einsatz nachwachsender Rohstoffe zur Energiegewinnung geschaffen. Aufgrund der großen Waldfläche in Deutschland von über 10 Mio. ha kann die Forstwirtschaft einen wichtigen Beitrag zur Erreichung dieses energiepolitischen Zieles leisten. Mit der vorliegenden Untersuchung wird das Energieholzpotenzial, das von der Forstwirtschaft bis zum Jahr 2005 zur Verfügung gestellt werden kann, in regionaler Untergliederung vorgestellt. Zugleich werden die für die Bereitstellung anfallenden Kosten berechnet. Deren Kenntnis gestattet eine Aussage über die Höhe des bei gegebenen Preisen für Hackschnitzel erwartbaren Energieholzaufkommens.

Die vorliegende Studie ist im Rahmen eines Gemeinschaftsprojektes entstanden, in dem Angebotsmengen für unterschiedliche Bioenergieträger auf Kreisebene ermittelt und die Ergebnisse anschließend auf ihre volkswirtschaftlichen Wirkungen hin analysiert werden. Durch die Einbindung in das Gemeinschaftsprojekt sind bestimmte Setzungen vorgegeben. Die wichtigsten dieser Vorgaben werden nachfolgend kurz dargelegt.

Als Biomasse zur Energiegewinnung aus Waldholz gilt das stofflich bisher nicht genutzte Waldholz. Es setzt sich aus Schwachholz und Waldrestholz (Kronenholz) zusammen. Da regionalisierte Informationen über Kapazitäten, Baumarten- und Sortimentsansprüche der Rohholznachfrager nicht vorliegen, wird pauschal für alle Baumarten und Regionen ein mittlerer Brusthöhendurchmesser von 16 cm mit Rinde als Untergrenze für die stoffliche Verwertung festgelegt. Mögliche Konkurrenzbeziehungen zwischen stofflicher und thermischer Verwertung werden damit in der Untersuchung nicht abgebildet.

Mit der Berechnung kreisweiser Ergebnisse wird eine weitere Vorgabe aus dem Gemeinschaftsprojekt erfüllt. Mit der Erfüllung dieser Vorgabe müssen jedoch für die alten Bundesländer vergleichsweise hohe Stichprobenfehler der berechneten Potenziale in Kauf genommen werden. Die im Kapitel 3 vorgestellten Ergebnisse sind zur Vermeidung statistisch schlecht abgesicherter Aussagen zu den größeren regionalen Einheiten der Raumordnungsregionen anstelle der Stadt- bzw. Landkreise zusammengefasst.

Für die auf Kreisebene ermittelten Potenziale werden für das Gemeinschaftsprojekt die durchschnittlichen Kosten verschiedener Bereitstellungsverfahren frei Werk benötigt. Mit durchschnittlichen Kosten können jedoch keine Mengenanpassungen an Marktpreise dargestellt werden. Um im Rahmen des Gemeinschaftsprojektes zumindest im Ansatz die Wirkung unterschiedlicher Preise für Hackschnitzel auf die bereitgestellte Biomasse abbilden zu können, wird das Energieholzpotenzial alternativ für zwei untere Aufarbeitungsgrenzen (8 cm mittlerer BHD und 12 cm mittlerer BHD) berechnet. Im Ergebnisteil der vorliegenden Arbeit wird darüber hinaus versucht, eine weitere Differenzierung des Energieholzaufkommens in Abhängigkeit vom Preis für Hackschnitzel vorzunehmen.

Zum leichteren Vergleich mit Potenzialen und Bereitstellungskosten anderer biogener Energieträger werden die Ergebnisse in t_{atro} bzw. $\text{DM}/t_{\text{atro}}$ ausgewiesen.

2 Material und Methoden

2.1 Abgrenzung und Quantifizierung der Biomassekomponenten eines Bestandes

2.1.1 Definition Biomasse

Unter Biomasse wird im allgemeinen die Menge an lebender ober- und unterirdischer, tierischer und pflanzlicher Substanz je Flächen- und Raumeinheit zu einem bestimmten Zeitpunkt verstanden (KRAMER, 1988, S. 42). Forstliche Biomasseuntersuchungen beschränken sich dabei vorrangig auf die Bäume. Die vorliegende Untersuchung hat wiederum nur einen Ausschnitt aus der Biomasse der Bäume zum Gegenstand. Es soll die Baum-Biomasse abgeschätzt werden, die derzeit vorwiegend aus wirtschaftlichen Gründen keiner stofflichen Verwertung zugeführt wird und somit für eine thermische Verwertung zur Verfügung steht.

Die gegenwärtig in der Forstwirtschaft eingesetzten Technologien sind überwiegend auf eine stoffliche Verwertung von Rohholz ausgerichtet. Mit ihnen ist die Aufarbeitung von Rohholz unterhalb gewisser Grenzdurchmesser nicht mehr wirtschaftlich lohnend. Dies führt dazu, dass Durchforstungsmaßnahmen in Waldbeständen mit einem kleinen Bestandesmitteldurchmesser vernachlässigt werden und in älteren Waldbeständen Rohholz aus dem Kronenbereich im Wald liegen bleibt. Die Rohholzmenge, die für eine thermische Verwertung zur Verfügung steht, setzt sich daher zum einen aus Schwachholz und zum anderen aus Waldrestholz zusammen.

Die unteren Durchmessergrößen, bis zu denen stoffliche Nutzung derzeit noch wirtschaftlich lohnend ist, sind für die einzelnen Landkreise und Baumarten nicht gleich. Sie können in Abhängigkeit von der Transportentfernung zu den verarbeitenden Unternehmen regional unterschiedlich hoch sein. Da die Nachfrage in dem der Untersuchung zugrunde liegenden Modell aber nicht regional abgebildet ist, muss auf alle Landkreise die gleiche untere Durchmessergröße für stoffliche Nutzung angewendet werden. Die untere Durchmessergröße für die stoffliche Verwertung von Schwachholzbeständen wird normativ auf einen Bestandesmitteldurchmesser von 16 cm mit Rinde festgelegt.

Bei der thermischen Verwertung von Rohholz sind die Ansprüche an Güte und Dimensionen geringer als bei der stofflichen Verwertung. Zusätzlich zum üblicherweise stofflich genutzten Rohholz können auch Äste, Reisig, Rinde sowie Laub und Nadeln thermisch genutzt werden. In Untersuchungen zum Aufkommen an Biomasse werden Laub und Nadeln regelmäßig aus der Nutzung der oberirdischen Biomasse ausgeklammert (KREUTZER, DAUBER, 1980, S. 2; BEMMANN et al., 1997, S. 706; HASCHKE, 1998, S. 806). Dies erfolgt vor allem wegen des hohen Gehaltes an Nährelementen in Laub und Nadeln (KRAMER, 1988, S. 43 f.). Bei deren Nutzung würden die Nährstoffe dem Nährstoffkreislauf des Bestandes entzogen werden. In der vorliegenden Studie erfolgt die Nutzung von Laub und Nadeln differenziert nach den unterstellten Bereitstellungsverfahren. In den Fällen, in denen die Hackung der Baumkomponenten notwendigerweise der Fällung direkt folgen muss, können Laub und Nadeln vor dem Hackvorgang nicht aus den Baumkronen entfernt werden. Dies trifft vor allem auf die vollmechanisierten Hackschnitzel-Bereitstellungsverfahren für Schwachholz zu, bei denen ein Harvester die Stämme fällt und im gleichen Arbeitsgang dem angebauten Hacker zuführt. In den Fällen, in denen ohne zusätzliche Kosten die Prozesse Fällung und Hackung zeitlich entkoppelt werden können, wird davon ausgegangen, dass die Hackung erst erfolgt, wenn die Nadeln durch Austrocknung natürlich ab-

gefallen sind. Die Möglichkeit der zeitlichen Verzögerung zwischen Fällung und Hackung bietet sich sowohl bei motormanueller Ernte als auch bei Einsatz von Vollerntern, wenn das Waldrestholz nach der Ernte von Stamm- und Industrieholz zunächst im Bestand verbleibt. Bei Laubholz kann das Problem des Nährstoffentzuges durch Ernte im Winter gelöst werden.

Biomasse aus Schwachholz umfasst daher die Masse des gesamten Stammes, der Äste, des Reisigs, der Rinde und, sofern Hackschnitzelharvester zum Einsatz kommen, der Nadeln. Biomasse aus Waldrestholz setzt sich aus Reisig in Rinde und dem nicht verwerteten Holz (X-, NV-Holz) inkl. des entsprechenden Rindenanteils zusammen. Abbildung 1 enthält ein Schema der unterschiedlichen Komponenten eines Baumes. Abbildung 2 zeigt diejenigen Komponenten, die zur thermischen Verwertung aus Schwachholz bzw. aus Waldrestholz bereitgestellt werden können.

Bei der Berechnung der Biomasse zur thermischen Verwertung werden lediglich oberirdische Baumkomponenten berücksichtigt. Die Rodung von Stöcken ist sehr aufwendig. Sie hat zudem, wegen der Notwendigkeit, den Bestand zu befahren, Bodenverdichtung auf der gesamten Bestandesfläche zur Folge. In Hanglagen kann Stockrodung Erosionen verursachen (KREUTZER, DAUBER, 1980, S. 2).

Abbildung 1: Schematische Darstellung der oberirdischen Komponenten eines Baumes

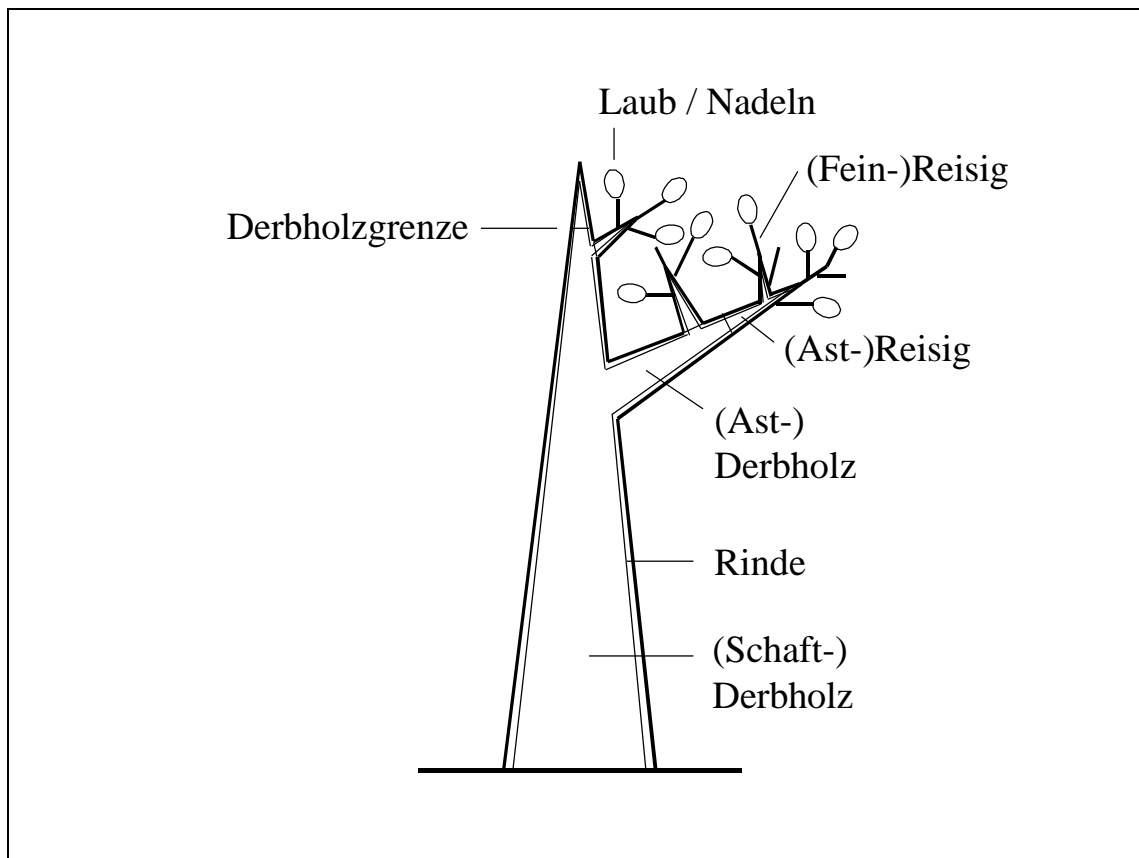
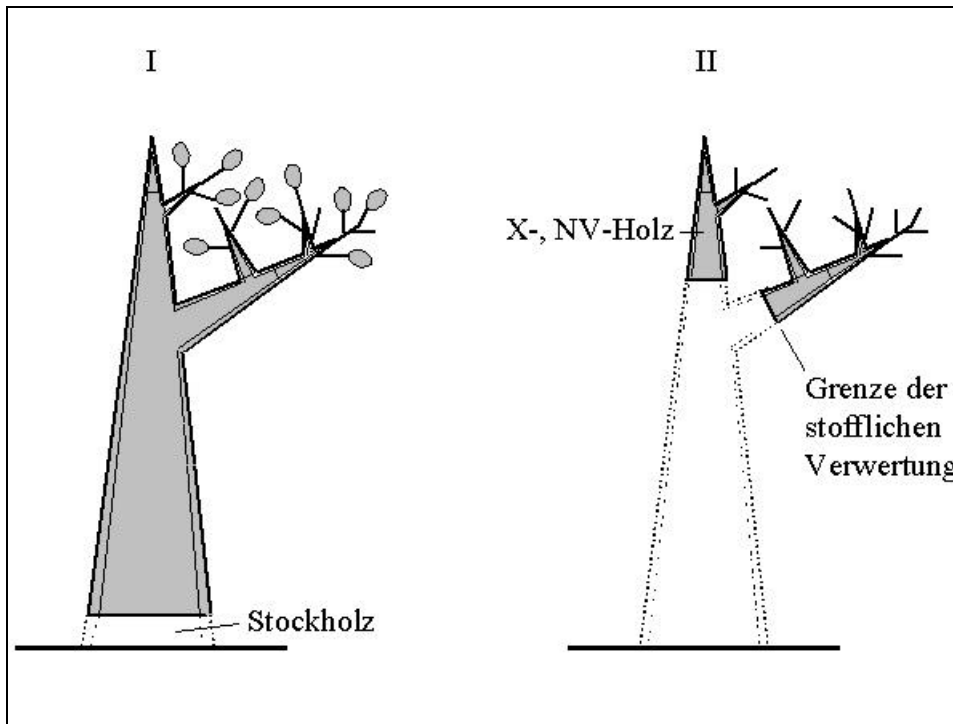


Abbildung 2: I Biomasse zur thermischen Verwertung aus Schwachholz, vollmechanisierte Bereitstellung, II Biomasse zur thermischen Verwertung aus Waldrestholz



2.1.2 Potenzial an Biomasse zur thermischen Verwertung aus Waldholz

In der Realität unterliegt die Ernte von Holz teilweise wirtschaftlichen, rechtlichen und technischen Einschränkungen. Das Potenzial an Biomasse zur thermischen Verwertung aus Waldholz kann daher nur aus derjenigen Menge bestehen, deren Nutzung nicht durch eine dieser Restriktionen ausgeschlossen ist. Zur Vereinfachung wird im Folgenden anstelle von „Potenzial an Biomasse zur thermischen Verwertung aus Waldholz“ synonym auch der Begriff „Energieholzpotenzial“ verwendet.

Da die Kosten der Biomasseproduktion aus Schwachholz mit sinkendem Durchmesser der auscheidenden Bäume exponentiell ansteigen, kann Hackschnitzelgewinnung unter gegebenen Preis-Kosten-Relationen erst ab bestimmten Durchmessern wirtschaftlich lohnend sein. Es werden daher alternativ zwei unterschiedliche Minstdurchmesser für die Hackung von Schwachholz vorgegeben. In einem Szenario wird nur Schwachholz mit einem Mitteldurchmesser von mindestens 12 bis 15 cm (BHD) berücksichtigt. In einem zweiten Szenario wird der Minstdurchmesser auf 8 cm (BHD) abgesenkt. Das Energieholzpotenzial erhöht sich damit. Gleichzeitig steigen aber auch die durchschnittlichen Kosten für die Bereitstellung von Biomasse aus Schwachholz an.

In den Kernzonen der Nationalparke und in Biosphärenreservaten kann die Holznutzung durch gesetzliche Bestimmungen eingeschränkt sein. In Steillagen der Mittelgebirge und der Alpen wird in aller Regel auf Holznutzungen wegen der hohen Erschließungs- und Erntekosten sowie der Erosionsgefahr verzichtet. Das Potenzial reduziert sich daher in solchen Gegenden gegenüber hinsichtlich Waldstruktur und -fläche vergleichbaren Landkreisen in der Ebene und ohne Nationalparke.

Bei der Interpretation des Potenzials an Biomasse zur thermischen Verwertung aus Waldholz muss bedacht werden, dass Brennholz und Hackschnitzel aus Waldholz bereits heute in großem Umfang zur Wärmeerzeugung eingesetzt werden. MELLINGHOFF, BECKER (1998, S. 109 f.) schätzen den Verbrauch von Brennholz aus dem Wald allein in privaten Haushalten und Kleinfeueranlagen im Jahr 1995 auf 8,5 Mio. m³.

Der Großteil des eingesetzten Brennholzes stammt aus Schwachholz und Waldrestholz und ist somit in dem hier ermittelten Energieholzpotenzial enthalten. Der private Brennholzverbrauch besteht neben Schwach- und Waldrestholz jedoch auch aus einem nicht näher bestimmtem Anteil an Brenn-Schichtholz. Das ist von den Forstverwaltungen bereitgestelltes und verkauftes geschichtetes Holz, das damit nicht in die Kategorie „nicht verwertet“ (NV) fällt. Da der Großteil des Schichtholzes an die Holzwerkstoff- und Papierindustrie verkauft wird, wird dieses Sortiment der stofflichen Nutzung zugerechnet und damit in der Berechnung des Energieholzpotenzials nicht berücksichtigt.

2.1.3 Quantitative Bestimmung der Biomassekomponenten

2.1.3.1 Derbholz mit Rinde

Zur Prognose von Waldwachstum und Nutzungsmengen dienen in der Regel Ertragstafeln. Die Nutzungsmengen werden in den meisten Ertragstafeln in Vorratsfestmetern Derbholz mit Rinde angegeben. Derbholz ist die gesamte oberirdische Masse eines Baumes (Schaft und Äste) mit einem Durchmesser inklusive Rinde von 7 cm und mehr.

Biomasse zur thermischen Verwertung aus Schwachholz beinhaltet das gesamte in der jeweiligen Ertragstafel angegebene Derbholz inklusive Rinde, abzüglich eines Abschlages für Ernteverlust. Da bei der Ernte von Schwachholz zur Hackschnitzelproduktion oberirdische Holzmasse am Stock verbleibt, ist ein Ernteverlust gegenüber der Angabe in Vorratsfestmetern vorzunehmen. Der Ernteverlust wird in Anlehnung an KRAMER, AKCA (1987, S. 247) mit 3 Prozent angenommen.

Zur Ausweisung der Menge an Derbholz, die aus Waldrestholz zur thermischen Verwertung bereit gestellt werden kann, ist es erforderlich, die Aufteilung des nutzbaren Derbholzvolumens auf die einzelnen Sortimente zu kennen. Die Bestandessortentafeln 82/85 von SCHÖPFER, DAUBER ermöglichen, die Anteile von Stammholz, von Industrieholz sowie von (stofflich) nicht verwertetem Holz (X- und NV-Holz) in Abhängigkeit vom Mitteldurchmesser abzuschätzen. Die Anwendung der Bestandessortentafeln setzt zwar den Bezug zu Erntefestmetern ohne Rinde voraus (SCHÖPFER, DAUBER, 1990, S. 242). X- und NV-Holz werden jedoch mit Rinde zu Hackschnitzeln verarbeitet, weshalb auf einen Rindenabzug verzichtet werden muss. Die Volumenbestimmung wird zudem für das Hackgut und nicht für das Rohholz vorgenommen, so dass der Derbholzverlust infolge der forstlich üblichen Abrundung bei der Bestimmung des Mitteldurchmessers ebenfalls nicht auftritt. Es wird aus diesem Grund die Menge an Derbholz zur thermischen Verwertung aus Waldrestholz ermittelt, indem die X- und NV-Holz Anteile nach SCHÖPFER, DAUBER (1990, S. 246 ff.) auf die Derbholzmasse der Ertragstafeln in Vorratsfestmetern in Rinde bezogen werden.

2.1.3.2 Reisig mit Rinde, Laub und Nadeln

Zur Berechnung der gesamten Biomasse der Bestände, die zur thermischen Verwertung zur Verfügung steht, werden die Derbholzangaben der Ertragstafeln um Zuschläge für das ebenfalls nutzbare Reisig (Ast- und Feinreisig, s. Abb. 1) sowie für die Nadelmasse, soweit es das Bereit-

stellungsverfahren erfordert, erhöht. Reisig umfasst alles Holz, dessen Durchmesser in Rinde weniger als 7 cm (Derbholzgrenze) beträgt. Zur möglichst genauen Abbildung der tatsächlichen Nutzungsverhältnisse werden die Zuschläge nach Altersklassen und Baumarten differenziert vergeben.

Tabelle 1 enthält die prozentualen Anteile an der oberirdischen Biomasse nach KRAMER, KRÜGER (1981, S. 34) für die vier Hauptbaumarten in der Einheit Tonnen atro (absolut trocken) pro Hektar. Die Anteile gelten für die durchschnittlichen Ertragsverhältnisse in der Bundesrepublik Deutschland (alter Gebietsstand) (KRAMER, KRÜGER, 1981, S. 33).

Tabelle 1: Prozentuale Anteile an der oberirdischen Biomasse; gewichtsbezogen [t_{atro}/ha]

		Altersklassen									
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Fichte	Derbholz m.R.	0	52	75	83	83	87	88	87	/	/
	Reisig m.R.	44	29	16	10	10	6	6	7	/	/
	Nadeln	56	19	9	7	7	7	6	6	/	/
Kiefer	Derbholz m.R.	0	67	75	81	81	82	85	84	/	/
	Reisig m.R.	69	20	15	11	10	12	10	8	/	/
	Nadeln	31	13	10	8	9	6	5	8	/	/
Buche	Derbholz m.R.	0	0	61	77	81	84	86	87	85	/
	Reisig m.R.	65	83	36	19	17	13	12	11	12	/
	Laub	35	17	3	4	2	3	2	2	3	/
Eiche	Derbholz m.R.	0	44	79	81	88	89	88	89	92	92
	Reisig m.R.	53	47	16	15	10	7	9	8	6	6
	Laub	47	9	5	4	2	4	3	3	2	2

Quelle: KRAMER, KRÜGER, 1981, S. 34; m.R. = mit Rinde; / = ohne Werte

Aus diesen Anteilen wird für Reisig in Rinde sowie gegebenenfalls für Nadeln der prozentuale Anteil bezogen auf die Derbholzmasse berechnet. Die so gewonnenen Faktoren können auf die je nach Ertragsklasse unterschiedlichen Derbholzvolumina innerhalb einer Baumart und Altersklasse angewendet werden. Auch DAUBER, KREUTZER (1979, S. 291) verwenden prozentuale Zuschläge zur Derbholzmasse bei ihrer Ermittlung des Potenzials forstlicher Reststoffe in der Bundesrepublik Deutschland. Um die Ergebnisse der Biomasseuntersuchung zu den Derbholzangaben der Ertragstafeln in Relation setzen zu können, ist es notwendig, einheitliche Bezugsgrößen zu verwenden. Da das Volumen von Reisig und Nadeln nur schwer bestimmbar ist, empfiehlt es sich, das Derbholzvolumen in t_{atro} auszudrücken. Für die Umrechnung von Festmeter in Tonne atro dienen die in Tabelle 2 dargestellten Faktoren. Die Verwendung von Zuschlagsfaktoren zum Derbholzvolumen aus den Ertragstafeln besitzt den Vorteil, dass mit steigender/sinkender Bonität die absolute Nutzungsmenge nicht nur des Derbholzes, sondern auch der Biomassekomponenten Reisig und Nadeln ansteigt/sinkt. Es wird unterstellt, dass Vor- und Endnutzungen gleiche Anteile der Biomassekomponenten aufweisen.

Tabelle 2: Rohholzgewicht (atro) in kg pro Festmeter

Baumart	Fichte	Kiefer	Buche	Eiche
Gewicht [kg/fm]	430	510	680	650

Quellen: REMLER, FISCHER, 1996, S. 64 f.; LOHMANN, 1980, S. 26 f.

In den Altersklassen, in denen nach Ertragstafelangaben kein Derbholz vorhanden ist, können keine prozentualen Zuschläge vergeben werden. In diesen Fällen wird entsprechend dem Vorgehen von KRAMER, KRÜGER (1981, S. 34) zwischen dem Wert 0 im Alter von 0 Jahren und den Werten der höheren Altersklassen interpoliert und daraus altersklassenweise Mittelwerte berechnet. Ergebnis dieses Vorgehens für die jüngeren Altersklassen sind absolute Volumenangaben für Reisig und Laub bzw. Nadeln. Da die absoluten Angaben von der Ertragsklasse abhängen, wird auf ihre explizite Darstellung verzichtet.

Die in Tabelle 1 enthaltenen Zahlen können zum Teil mit anderen Ergebnissen aus der Literatur verglichen werden. So berechnet NEBE (1979, S. 154) für „ältere“ Fichtenbestände über 40 Jahren in der ehemaligen DDR den Anteil der Zweige und Nadeln an der oberirdischen Biomasse mit 24 %. Die Schätzung NEBES passt sehr gut zu den Ergebnissen von KRAMER, KRÜGER (1981, S. 34) für 40 bis 60 jährige Fichtenbestände. Für Fichtenbestände in der 4. und 5. Altersklasse ergibt sich jedoch eine Differenz von 7 Prozentpunkten. Eine sehr gut mit den Werten von KRAMER und KRÜGER übereinstimmende Schätzung für einen Fichtenbestand der 4. Altersklasse stammt von DROSTE ZU HÜLSHOFF (1969, S. 187 ff.). DROSTE ZU HÜLSHOFF ermittelt für einen 76 Jahre alten Fichtenbestand den Anteil der grünen Baumkrone (Triebachse und Nadeln) und der Trockenäste an der oberirdischen Biomasse ebenfalls mit 17 %. Die Schätzung NEBES (1979, S. 154) für „ältere“ Kiefernbestände über 35 Jahren liefert einen Anteil der Zweige und Nadeln von 14 %. Sie liegt damit etwas unter den Berechnungen von KRAMER und KRÜGER. Für die Baumart Buche kann auf eine umfangreiche Untersuchung im Göttinger Wald zurückgegriffen werden (PELLINEN, 1986, S. 56 ff.). Für die der Tabelle 1 zugrunde liegende Ertragsklasse der Buche errechnet PELLINEN folgende Reisig- und Derbholzanteile (Tab. 3). Auch bei diesen zeigen sich sehr gute Übereinstimmungen zwischen der Schätzung von KRAMER und KRÜGER und derjenigen von PELLINEN. Alle Berechnungen erfolgten ebenfalls in t_{atro}/ha .

Tabelle 3: Prozentuale Anteile an der Baumholz-Biomasse; gewichtsbezogen [t_{atro}/ha]

		Altersklassen									
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Buche	Derbholz m.R.	/	/	/	82	87	88	88	/	/	/
	Reisig m.R.	/	/	/	18	13	12	12	/	/	/

Quelle: PELLINEN, 1986, S. 56 ff.; berechnet jeweils für die Mitte der Altersklasse; Ertragstafel WIEDEMANN, mäßige Durchforstung; / = ohne Werte

Die in Tabelle 1 enthaltenen Werte sind, wie der Vergleich mit den Ergebnissen anderer Arbeiten zeigt, geeignet, zusammen mit Ertragstafeldaten den Biomasseanfall von Beständen nach Baumarten und Altersklassen zu charakterisieren.

2.2 Bereitstellungsverfahren für Biomasse

2.2.1 Übersicht

Die derzeit im Einsatz befindlichen Verfahren zur Bereitstellung von Hackschnitzeln aus Waldholz lassen sich nach ihrem Mechanisierungsgrad in vollmechanisierte, teilmechanisierte und motormanuelle Bereitstellungsverfahren einteilen. Die Bereitstellungskosten pro Einheit Hackschnitzel streuen je nach eingesetztem Verfahren. Innerhalb eines Verfahrens hängen sie vom Durchmesser des ausscheidenden Bestandes sowie davon ab, ob Hackschnitzel aus Schwachholz oder Waldrestholz hergestellt werden.

Der weit überwiegende Teil der zur Verfügung stehenden Studien hat die Produktion von Hackschnitzeln aus Schwachholz zum Inhalt. Untersuchungen zur Herstellung von Hackschnitzeln aus Waldrestholz existieren bis auf eine Ausnahme nicht. Ebenso ungleich ist das Gewicht zwischen Untersuchungen für Nadel- und Laubholz verteilt. Fast alle Untersuchungen beziehen sich auf Maßnahmen in Nadelholzbeständen.

Für das Projektvorhaben sind aus mehreren möglichen Verfahren (vgl. v.a. REMLER, FISCHER, 1996) diejenigen auszuwählen, die für den jeweiligen Anwendungsfall am besten geeignet sind. Bei der Auswahl sind vor allem der Mitteldurchmesser des ausscheidenden Bestandes sowie die Topographie zu berücksichtigen. Die Topographie ist eine wesentliche Bestimmungsgröße für den maximal möglichen Mechanisierungsgrad bei der Produktion von Hackschnitzeln in einer Region. Eine zusätzliche Unterscheidung der Verfahren nach ihrer Vorteilhaftigkeit für unterschiedliche Baumarten wäre wünschenswert, lässt sich jedoch anhand der vorliegenden Arbeitsstudien nicht durchführen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Studien sind nur eingeschränkt vergleichbar. So sind die Längen der Rückestrecken nicht einheitlich, die Untersuchungen sind an unterschiedlichen Baumarten und Baumartenmischungen durchgeführt worden und die Transportkosten zu den Heizkraftwerken sind nicht durchgängig berücksichtigt. Zudem wurde mit zum Teil voneinander abweichenden Lohnsätzen gerechnet. Im Zuge der Aufbereitung der Daten zur Integration in das Programm zur Potenzialabschätzung wurden die Daten soweit wie möglich vergleichbar gemacht. Die Transportstrecke wird entsprechend der Projektvorgabe auf 20 km festgelegt. Im Folgenden werden die ausgewählten Verfahren kurz beschrieben und deren Kosten sowie notwendige Ergänzungen offengelegt. In einer weiteren Übersicht werden die Verfahren den jeweiligen Anwendungsfällen zugeordnet.

Die Kosten sind zum leichteren Vergleich mit den zugrunde liegenden Originalquellen durchgängig in DM pro Schüttraummeter angegeben. Die für die Potenzialberechnung erforderliche Umrechnung in DM pro Tonne atro erfolgt mit baumartspezifischen Faktoren entsprechend den Festmetergewichten aus Tabelle 2. Ein Schüttraummeter Hackschnitzel entspricht dabei 0,4 Festmeter Holz.

2.2.2 Vollmechanisierte Waldhackschnitzel-Bereitstellung

In mehr oder weniger ebenem Gelände, bei ausreichender Anzahl und Größe der Durchforstungsbestände sowie bei guter Erschließung und Organisation ist die für die Durchforstung schwacher Bestände günstigste Bereitstellungslinie in der Regel ein Hackschnitzel-Harvester zusammen mit einem Container-Shuttle-Fahrzeug. Die Beschreibung eines solchen Arbeitsver-

fahrens sowie die ausführliche Dokumentation der Ergebnisse einer entsprechenden Arbeitsstudie findet sich bei FELLER et al. (1998).

Der Hackschnitzel-Harvester ist eine Maschine, mit der Bäume sowohl gefällt als auch im angebauten Aggregat gehackt werden können. Bei Stämmen stärkerer Dimensionen kann Industrie- bzw. Stammholz ausgehalten werden. Das Reststück wird gehackt. Ebenso können rotfaule Erdstammstücke gehackt werden. Der Hackschnitzel-Harvester arbeitet von der Rückegasse aus. Die Hackschnitzel werden in einen mitgeführten Bunker geblasen, der, ebenfalls auf der Rückegasse, in den Container des Shuttle-Fahrzeuges entleert wird. Das Shuttle-Fahrzeug liefert die Hackschnitzel zu LKW-Containern an der Waldstraße. Der Einsatz des Verfahrens setzt eine entsprechende Bestandeserschließung voraus. Die notwendigen Rückegassen in einem Abstand von 20 m können auch durch den Hackschnitzel-Harvester selber angelegt werden.

Die Arbeitszeitstudie wurde von FELLER et al. (1998) in drei unterschiedlich alten Durchforstungsbeständen im Süden Bayerns durchgeführt. Zwei der Bestände waren reine Fichtenbestände, im dritten war der Fichte Kiefer beigemischt. Leistung und Kosten des Hackschnitzel-Harvesters wurden separat für die Herstellung von Hackschnitzeln aus Rohschäften, aus Kronenholz und aus rotfaulen Erdstammstücken berechnet.

2.2.2.1 Hackschnitzel aus Schwachholz (Rohschäfte)

Die Kosten für die vollmechanisierte Bereitstellung von Hackschnitzeln aus Schwachholz liegen in der Studie von FELLER et al. (1998) getrennt nach Brusthöhendurchmessern vor. Zur Berechnung der Kosten für den Transport der Hackschnitzel mit dem Shuttle ist es notwendig, die Rückeentfernung auf der Rückegasse sowie auf der Waldstraße festzulegen. Im Anhalt an die in den Untersuchungsbeständen vorgefundene Erschließung (FELLER et al., 1998, S. 26) wird mit jeweils 150 m Entfernung gerechnet. Da die Lieferung von Hackschnitzeln in der Regel „frei Werk“ vereinbart ist, müssen zusätzlich die Kosten für den Transport auf der Straße (20 km) berücksichtigt werden. In Tabelle 4 sind die Kosten der Studie von FELLER et al. (1998) für die vollmechanisierte Bereitstellung von Hackschnitzeln aus Schwachholz in DM pro Schüttraummeter dargestellt.

Zwar sind die in die Arbeitsstudie einbezogenen Bestände nicht repräsentativ für alle Baumarten in Deutschland. Da aber vergleichbare Studien weder für andere Regionen Deutschlands noch für Laubbäume existieren, wird bei vollmechanisierten Bereitstellungsverfahren für Hackschnitzel aus Schwachholz stets von den Kosten aus Tabelle 4 ausgegangen.

Für Brandenburg (PLATH, KROOP, 1996) und Dänemark (SCHWANITZ, 1994) liegen zwar Untersuchungen zur vollmechanisierten Hackschnitzelherstellung vor. PLATH, KROOP (1996, S. 58) verwenden aber Kosten pro Einsatzstunde für Harvester und Hackmaschine, die weit unter den von FELLER et al. (1998, S. 75) berechnet liegen. Auch OHRNER (1999, S. 728) berechnet für den Harvestereinsatz Kosten, die um ca. 100 % über denen von PLATH und KROOP liegen. Die Arbeit von SCHWANITZ (1994) ist kaum interpretierbar, da die den Kalkulationen zugrunde liegenden Maschinenkosten nicht veröffentlicht sind. Die beiden Studien für Brandenburg und Dänemark weisen zudem Ergebnisse nur für jeweils einen einzigen mittleren Brusthöhendurchmesser (8 cm) aus und sind daher für die vorliegende Untersuchung kaum zu gebrauchen. Über vollmechanisierte Verfahren zur Herstellung von Hackschnitzeln in Laubholzbeständen sind keine Studien bekannt (FELLER et al., 1999, S. 2).

Tabelle 4: *Kosten der Hackschnitzelproduktion bei Einsatz eines Hackschnitzel-Harvesters und eines Container-Shuttle-Fahrzeuges in DM/Srm*

BHD [cm]	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
HS-Produktion	161,2	113,7	77,0	53,9	39,5	30,2	24,0	19,7	16,6	14,2	12,5
Rücken	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9	7,9
LKW-Transport	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Gesamt	172,7	125,2	88,5	65,4	51,0	41,7	35,5	31,2	28,1	25,7	24,0

Quellen: Hackschnitzelproduktion: FELLER et al., 1998, S. 32

Rücken mit dem Shuttle: FELLER et al., 1998, S. 34 (inkl. Wartezeiten)

LKW-Transport: REMLER, FISCHER, 1996, S. 34 (LKW mit Anhänger, 50 Srm)

2.2.2.2 Hackschnitzel aus Waldrestholz (Kronenholz, rotfaule Erdstammstücke)

Die Aussagen zur Produktion von Hackschnitzeln aus Waldrestholz stützen sich wiederum auf Untersuchungen von FELLER et al. (1998). In entsprechend starken Beständen kann mit dem Hackschnitzel-Harvester auch Industrie- bzw. Stammholz ausgehalten werden. Das verbleibende Reststück wird in einem Arbeitsgang mit der Industrie- bzw. Stammholzaushaltung gehackt. Ebenso können rotfaule Stammteile abgetrennt und gehackt werden. Der Einsatzbereich des Hackschnitzel-Harvesters endet allerdings bei einem BHD von 35 cm. In Beständen mit höherem BHD nimmt seine Leistung ab (FELLER et al., 1998, S. 23). Kosten und Leistung der Hackschnitzelproduktion aus Waldrestholz (Kronenholz, rotfaule Erdstammstücke) ermitteln FELLER et al. (1998, S. 33) in Abhängigkeit von der Stückmasse.

Die ermittelten Kosten setzen sich aus den Kosten zusammen, die dem jeweiligen Sortiment direkt zugeordnet werden können (z. B. das Hacken der Hackschnitzel) sowie den Kosten, die nur einem Baum (z. B. Anbringen des Fällaggregates) oder einer Gruppe von Bäumen (z. B. Fahrstrecke bis zu einem Punkt, von dem aus mehrere Bäume gefällt werden) zuzuordnen sind. Diese den Sortimenten nicht direkt zuordenbaren Kosten werden ihnen proportional zu ihren Volumenanteilen zugewiesen. Die von FELLER et al. (1998, S. 33) berechneten Kosten der Hackschnitzelproduktion aus Waldrestholz beinhalten damit auch Anteile an den Gemeinkosten. Da eine Rückrechnung auf die entscheidungsrelevanten Kosten nicht möglich ist, müssen die von FELLER et al. (1998, S. 33) ermittelten Kosten den Berechnungen der vorliegenden Untersuchung zugrunde gelegt werden.

FELLER et al. (1998, S. 33) differenzieren die Kosten der Hackschnitzelherstellung aus Waldrestholz nach der Stückmasse der Kronen. Zum Ausgleich für die Zuweisung nicht entscheidungsrelevanter Kosten werden für Hackschnitzel aus Waldrestholz pauschal die Bereitstellungskosten bei einer relativ hohen Stückmasse von 0,08 Festmeter gewählt. Sie betragen inklusive Rücken und LKW-Transport (20 km) DM 22 pro Schüttraummeter Hackschnitzel.

2.2.3 Teilmechanisierte Waldhackschnitzel-Bereitstellung

Von teilmechanisierten Verfahren wird gesprochen, wenn nicht der gesamte Prozess der Ernte, des Rückens sowie des Hackens maschinell erfolgt. Im Gegensatz zu vollmechanisierten Verfahren ist ihr Einsatz auch in geneigterem Gelände möglich. FELLER et al. (1999) untersuchten zwei teilmechanisierte Verfahren zur Herstellung von Waldhackschnitzeln im Norden Bayerns. Das erste Verfahren wurde in drei Laubholzbeständen angewendet. Es lässt sich folgendermaßen charakterisieren: Die Ernte erfolgt motormanuell, die Bäume werden mit einer Funkseilwinde an die Rückegasse vorgeliefert, mit einem Forstspeziialschlepper auf die Waldstraße gerückt und

dort gepoltet. Das Hacken übernimmt ein kranbeschickter Mobilhacker an der Waldstraße. Die Hackschnitzel werden in einen LKW-Container geblasen, den Abtransport übernehmen LKW. Das zweite Verfahren wurde in einem Nadelholzbestand angewendet. Dieses Verfahren unterscheidet sich vom ersten darin, dass das Rücken und teilweise auch das Vorliefern von einem Zangenschlepper übernommen wird. Da die Untersuchung jedoch nur Ergebnisse für mittlere Durchmesser (BHD) von mindestens 10 cm liefert, muss zur Herleitung der Kosten für die Hackschnitzelproduktion in Beständen mit geringeren Mitteldurchmessern auf andere Arbeiten zurückgegriffen werden.

Eine Zusammenstellung bereits existierender Untersuchungen über Hackschnitzel-Bereitstellungsverfahren (REMLER, FISCHER, 1996, S. 44) enthält Kosten und Leistung eines dem von FELLER et al. (1999) in den drei Laubholzbeständen untersuchten ähnlichen teilmechanisierten Verfahrens. Die Leistungsangaben sind nicht nach Baumarten unterschieden. Die Kosten des Verfahrens sind für die Durchmesser (BHD) 5, 10 und 15 cm angegeben.

Ein direkter Vergleich der Kosten der beiden Studien ist möglich, da in beiden Studien mit gleichen Lohnsätzen in Höhe von DM 40 pro Stunde gerechnet wird (REMLER, FISCHER, 1996, S. 44; FELLER et al., 1999, S. 10). Lediglich bei der Transportentfernung ist bei REMLER, FISCHER (1996, S. 44) für die um weitere 5 km längere Strecke eine Korrektur um DM 0,40 notwendig. In beiden Untersuchungen betragen die Kosten je Schüttraummeter Hackschnitzel bei 15 cm BHD DM 33. Bei 10 cm BHD liegt das Ergebnis der jüngeren Studie mit DM 45 um etwa DM 5 unter dem der älteren. Für einen BHD von 5 cm weist nur die Arbeit von REMLER, FISCHER (1996, S. 44) Kosten aus. Sie betragen DM 73 je Schüttraummeter Hackschnitzel. Für den Durchmesserbereich 5 bis 9 cm wird daher zwischen DM 73 bei 5 cm BHD (REMLER, FISCHER, 1996, S. 44) und DM 45 bei 10 cm BHD (FELLER et al., 1999, S.23) interpoliert. Für den Bereich von 10 bis 15 cm BHD werden die Ergebnisse der Untersuchung von FELLER et al. (1999, S.23) verwendet. Tabelle 5 enthält die Kosten in der Übersicht.

Tabelle 5: Kosten der Hackschnitzelproduktion bei Einsatz teilmechanisierter Verfahren in DM/Srm

BHD [cm]	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
HS-Produktion	69,8	64,1	58,4	52,6	46,9	41,2	37,8	35,1	32,9	31,0	29,4
LKW-Transport	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Gesamt	73,4	67,7	62,0	56,2	50,5	44,8	41,4	38,7	36,5	34,6	33,0

Quellen: Hackschnitzelproduktion: REMLER, FISCHER, 1996, S. 44 (Lohnsatz, interpoliert); FELLER et al., 1999, S. 23 (inkl. Wartezeiten)
LKW-Transport: REMLER, FISCHER, 1996, S. 34 (LKW mit Anhänger, 50 Srm)

Ab einem BHD von 10 cm liegen die Kosten des teilmechanisierten Verfahrens über denen des vollmechanisierten Verfahrens. Der Grund hierfür liegt weniger in den unterschiedlichen Baumarten, an denen die Ergebnisse gewonnen wurden, als vielmehr darin, dass teilmechanisierte Verfahren die Nachteile mechanisierter Verfahren, hohe Maschinenkosten, mit den Nachteilen manueller Arbeit, geringe Leistung, vereinen (FELLER et al., 1999, S. 25). Im schwachen Durchmesserbereich an der Derbholzgrenze liegen allerdings die Kosten des vollmechanisierten Bereitstellungsverfahrens zum Teil deutlich über denen des teilmechanisierten Verfahrens. Der Grund dafür dürfte darin liegen, dass vollmechanisierte Verfahren in schwachen Durchmesserbereichen, z. B. bei 5 cm BHD, nur ähnlich geringe Leistung aufweisen wie teilmechanisierte Verfahren (REMLER, FISCHER, 1996, S. 44; FELLER et al., 1998, S. 32), wegen der höheren Maschinenkosten aber insgesamt höhere Kosten pro produzierter Einheit besitzen. Zudem liegen die Untersu-

chungen unterschiedlich weit zurück, so dass Unterschiede im Kostenniveau erwartet werden können. So wurde bei der Untersuchung des vollmechanisierten Verfahrens beispielsweise mit Lohnkosten in Höhe von DM 55,90 pro Stunde gerechnet (FELLER et al., 1998, S. 76), REMLER, FISCHER (1996, S. 44) kalkulieren hingegen mit DM 40 pro Stunde. Da der Lohnunterschied aber auch auf die unterschiedlich hohe Qualifikation zurückzuführen sein kann, die die unterschiedlichen Verfahren erfordern, werden die Lohnkosten nicht nachträglich angeglichen.

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen zu den teilmechanisierten Bereitstellungsverfahren gelten nur für die Hackschnitzelproduktion aus Schwachholz. Zu Leistung und Kosten der Hackschnitzelherstellung aus Waldrestholz liegen keine Informationen vor. Grundsätzlich lassen sich auch Baumkronen mit dem beschriebenen teilmechanisierten Verfahren zu Hackschnitzeln verarbeiten. Die für die Produktion eines Schüttraumeters Hackschnitzel anfallenden Kosten dürften dabei gegenüber denen bei Schwachholzverarbeitung von den einzelnen Arbeitsschritten in unterschiedliche Richtungen beeinflusst werden. Positiv dürfte sich auf die Kosten auswirken, dass Fällen sowie Entasten entfallen. Kosten erhöhend dürfte sich andererseits auswirken, dass Baumkronen sperriger sind als Schaftholz und der Rücke- und Hackprozess dadurch erschwert wird oder zusätzliche Trennschnitte notwendig werden. Das Ausmaß der Beeinflussung der Produktionskosten lässt sich kaum quantifizieren. Da für Kronen sowie für stofflich nicht verwertete Stammteile keine BHD-Angaben vorliegen, lassen sich die Kosten für deren Verarbeitung zu Hackschnitzeln auch nicht nach ihrem Volumen unterscheiden. Es muss daher eine pauschale Annahme über die Kosten getroffen werden. Für den Einsatz teilmechanisierter Verfahren zur Herstellung von Hackschnitzeln aus Waldrestholz werden die Kosten für Schwachholz mit einem BHD von 10 cm unterstellt. Diese Grenze trägt dem Umstand Rechnung, dass Derbholz in der Regel nicht bis zur Derbholzgrenze von 7 cm ausgehalten und stofflich verwertet wird.

2.2.4 Motormanuelle Waldhackschnitzel-Bereitstellung

Eine Form der Hackschnitzelbereitstellung mit nur geringem Mechanisierungsgrad besteht in motormanueller Ernte, händischem Vorliefern und Hacken mit einem Anbauhacker auf der Waldstraße. Wegen der hohen Arbeitsintensität kann das Verfahren allerdings nur bei sehr niedrigen Lohn- bzw. Opportunitätskosten angewendet werden. Es kommt vor allem für den bäuerlichen Privatwald in Betracht. Wegen der von Landwirten in der Regel nur sehr niedrig eingeschätzten Opportunitätskosten werden die Hackschnitzel mit dem Traktor abgefahren. Motormanuelle Waldhackschnitzel-Bereitstellung ist in mehr oder weniger allen begeharen Lagen möglich, der erforderliche Organisationsaufwand ist gering.

REMLER, FISCHER (1996, S. 39) kalkulieren für das Verfahren Maschinenringsätze in Höhe von DM 18 pro Stunde. Die Kosten pro Schüttraumeter Hackschnitzel auf dieser Basis zeigt Tabelle 6. Die Originalangaben enthalten DM 2,60 pro Schüttraumeter Hackschnitzel für den Transport über 5 km zum Hof (REMLER, FISCHER, 1996, S. 34). Dieser Betrag wird abgezogen und zum Zwecke der Vergleichbarkeit mit den Ergebnissen anderer Verfahren durch die Kosten für den Transport über 20 km, ebenfalls mit dem landwirtschaftlichen Traktor und Anhänger, ersetzt. Die Kosten sind für BHD von 5, 10 und 15 cm angegeben. Die Werte dazwischen wurden mit einem Polynom zweiten Grades ausgeglichen.

Tabelle 6: Kosten der motormanuellen Hackschnitzelproduktion in DM/Srm

BHD [cm]	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
HS-Produktion	44,4	41,0	37,8	35,0	32,6	30,4	28,6	27,0	25,8	25,0	24,4
Transport	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7	7,7
Gesamt	52,1	48,7	45,5	42,7	40,3	38,1	36,3	34,7	33,5	32,7	32,1

Quelle: REMLER, FISCHER, 1996, S. 34, 39

Bei der Beurteilung der Kosten ist zu berücksichtigen, dass die unterstellte Distanz, über die die Bäume gerückt werden, mit 30 m sehr gering ist. In empirischen Arbeitszeitstudien sind durchschnittliche Rückeentfernungen von 280 m (FELLER et al., 1998, S. 26) bzw. 200 m (FELLER et al., 1999, S. 23) gemessen worden. Die in durchschnittlichen Beständen zu erwartenden Gesamtkosten bei motormanueller Hackschnitzelherstellung dürften daher deutlich über den in Tabelle 6 gezeigten liegen. REMLER, FISCHER (1996, 39) geben zwar die in der jeweiligen Bereitstellungsline eingesetzten Maschinen mit deren Stundensätzen an. Der Umfang, in dem die Maschinen bei der Hackschnitzelproduktion aber eingesetzt werden, lässt sich der Studie nicht entnehmen. Aus diesem Grund ist eine Neuberechnung der Produktionskosten bei Zugrundelegen einer längeren Rückeentfernung nicht möglich.

Für die motormanuelle Herstellung von Hackschnitzeln aus Waldrestholz gilt das im Kapitel über teilmechanisierte Verfahren Gesagte. Die in Tabelle 6 enthaltenen Kosten bei einem BHD von 10 cm werden für die Hackschnitzelproduktion aus Waldrestholz verwendet.

2.2.5 Zuordnung der Verfahren zur Waldhackschnitzel-Bereitstellung

Für die Abschätzung des Energieholzpotenzials und die Kalkulation der Bereitstellungskosten muss bestimmt werden, in welchem Umfang die verschiedenen Bereitstellungsverfahren für Hackschnitzel zur Anwendung gelangen. Da die Untersuchung zum Ziel hat, das Energieholzpotenzial und dessen Bereitstellungskosten zu ermitteln, können nicht die gegenwärtigen Anteile der Verfahren an der Hackschnitzelherstellung übernommen werden. Es müssen die Verfahren im Modell so eingesetzt werden, wie es bei Hackschnitzelproduktion in großem Umfang möglich und sinnvoll wäre. Das bedeutet, dass die höher mechanisierten Verfahren auch einen gegenüber den heutigen Verhältnissen höheren Anteil an der Hackschnitzelproduktion erhalten. Idealisierend ist dabei unterstellt, dass die Bestände erschlossen und die eingesetzten Maschinen entsprechend ausgelastet sind.

Es ist jedoch nicht zu erwarten, dass die gesamte Hackschnitzelproduktion voll- bzw. teilmechanisiert durchgeführt werden kann. Gerade für Landwirte kann es aufgrund ihrer geringen Opportunitätskosten für Arbeits- und Maschineneinsatz lohnend sein, Energieholz motormanuell aufzuarbeiten. Im Modell wird für motormanuelle Bereitstellung pauschal ein Anteil in Höhe von 10 % bezogen auf die Waldfläche angenommen.

Bei der Wahl der Bereitstellungsverfahren bedarf insbesondere die Topographie einer Region der Berücksichtigung. Der Einsatz von Holzernte- und Rückefahrzeugen ist nach BEHRNDT (1999, S. 644) auf Flächen mit einer Steigung von maximal 30 % beschränkt. In Hanglagen mit mehr als 30 % Neigung können Ernte- und Rückefahrzeuge nicht mehr sicher und zuverlässig eingesetzt werden. Eine Ausnahme hiervon bilden Raupenharvester mit nivellierbarem Drehkranz (STAMPFER, STEINMÜLLER, 2000). Da deren Anteil an der Holzernte in Deutschland aber bisher noch sehr gering ist, bleibt der Einsatz vollmechanisierter Verfahren zur Hackschnitzelherstel-

lung im Modell auf Gebiete mit Steigungen bis 30 % beschränkt. In Hanglagen mit 30 % bis 60 % Steigung können teilmechanisierte Verfahren eingesetzt werden. In Hanglagen mit mehr als 60 % Steigung ist mechanisierte Holzernte nicht mehr möglich. Motormanuelle Holzernte ist in diesen Lagen sehr beschwerlich, die Holzbringung ist oft nur unter hohem technischen Aufwand, beispielsweise unter Einsatz von Seilkrananlagen möglich. Wegen der daraus resultierenden hohen Ernte- und Bringungskosten sowie aus Rücksicht auf die Gefahr von Bodenerosionen durch Erschließungsmaßnahmen werden Bestände in Steillagen von einer Nutzung im Modell ausgeschlossen.

Die Verfahrenswahl ist im Überblick in Abbildung 3 zusammengefasst.

Abbildung 3: Übersicht über die Zuordnung der Bereitstellungsverfahren für Biomasse aus Waldholz und deren unterstellter Anteil an der Waldfläche im Modell

Anteil	10 %	90 %		
Topographie				
Hangneigung < 30 %	motor- manuell	Schwach- holz	vollmechanisiert	
		Waldrest- holz	Ø BHD < 35 cm	vollmechanisiert
			Ø BHD ≥ 35 cm	teilmechanisiert
Hangneigung 30 % - 60 %	motor- manuell	teilmechanisiert		
Hangneigung > 60 %	keine Nutzung	keine Nutzung		

2.3 Datengrundlagen

2.3.1 Waldzustand und Waldentwicklung

2.3.1.1 Der Wald in den alten Bundesländern (ABL)

Die Berechnung des Potenzials an Energieholz in den alten Bundesländern basiert auf den Daten der Bundeswaldinventur (Stichtag 01.10.1987). Mit der Bundeswaldinventur (BWI) wurden Waldfläche und Vorrat sowie weitere forstlich relevante Informationen nach Baumartengruppen und Altersklassen in einem Stichprobenverfahren im 4 km x 4 km Raster erhoben (vgl. BICK, DAHM, 1992). Jeder Stichprobenpunkt ist eindeutig einem Land- oder Stadtkreis zugeordnet. Die Daten der BWI werden für das vorliegende Projekt so aufbereitet, dass sie die Baumarten- und Altersklassenstruktur in einem Landkreis widerspiegeln. Auf eine weitere Unterscheidung nach Eigentumsarten wird im Hinblick auf den ohnehin hohen Stichprobenfehler verzichtet. Die Al-

tersstruktur ist in fünfjährigen Altersstufen erfasst. Für die Potenzialberechnung wird lediglich die Fläche des Wirtschaftswaldes berücksichtigt.

2.3.1.2 Der Wald in den neuen Bundesländern (NBL)

Informationen über Zustand und Struktur des Waldes in den neuen Bundesländern können verschiedenen Datenspeichern entnommen werden. Der wichtigste Datenspeicher, der Datenspeicher Waldfonds, enthält die Forsteinrichtungsdaten aller Bestände der ehemaligen staatlichen Forstwirtschaftsbetriebe zum Stichtag 1.1.1993. Daneben stehen die Forsteinrichtungsdateien der ehemaligen Militärforstbetriebe sowie der Kirchenforsten zur Verfügung. Die Daten der Militärwälder, die sich im Besitz der Gemeinschaft unabhängiger Staaten (GUS) befunden haben, werden auf Basis der Daten der staatlichen Militärforstbetriebe hochgerechnet. Die Bestandesinformationen werden auf der Ebene von Forstämtern bzw. für Brandenburg auf der Ebene von Oberförstereien aggregiert. Da in den neuen Bundesländern Walddaten nicht nur auf Stichprobenbasis sondern bestandesweise vorliegen, besitzen die für Landkreise berechneten Potenziale für die neuen Länder eine höhere statistische Genauigkeit als diejenigen für die alten Bundesländer.

2.3.1.3 Simulation der Waldentwicklung

Die naturale Datenbasis für die Berechnung des Potenzials an Energieholz liegt für die alten und neuen Bundesländer zu unterschiedlichen Stichtagen vor. Für die Abschätzung des Energieholzpotenzials für den Zeitraum 2000 bis 2005 müssen die Waldinformationen zunächst bis zum Jahr 2000 fortgeschrieben werden. Darauf aufbauend kann die Potenzialberechnung bis 2005 erfolgen.

Die Fortschreibung der durch Aggregation auf Landkreis- bzw. Forstamtsebene entstandenen ideellen Bestände geschieht mit Hilfe von Ertragstafeln. Tabelle 7 zeigt die verwendeten Ertragstafeln, deren Anwendungsbereich sowie die gewählten Umtriebszeiten. Die Umtriebszeiten sind POLLEY et al. (1996, S. 200 ff.) entnommen und über Eigentumsarten und Bundesländer gemittelt. Für aggregierte Bestände, die zum Stichtag bereits älter als die Umtriebszeit sind, müssen die Ertragstafeln über das maximale Alter hinaus extrapoliert werden. Dabei gilt die vereinfachende Annahme, dass die dendrometrischen Kennwerte Höhe, Mitteldurchmesser und verbleibender Vorrat gleich bleiben, während Zuwachs und in gleichem Masse Nutzung mit dem Alter exponentiell abnehmen.

Die aggregierten ideellen Bestände werden über ihre Mittelhöhe auf Zehntel Ertragsklassen bonitiert. Der Bestockungsgrad wird über das Verhältnis gemessener Vorrat zu Ertragstafelvorrat ermittelt. Der Bestockungsgrad bestimmt, um welchen Anteil Zuwachs und Nutzung aus der Ertragstafel reduziert bzw. erhöht werden müssen. Die Zuwachs- und Nutzungsveränderung erfolgt linear proportional zum Bestockungsgrad (vgl. KRAMER, AKCA, 1987, S. 202). Zur Vermeidung unplausibel hoher Zuwächse wird jedoch maximal der Faktor 1,3 zugelassen. Ertragsklasse und Bestockungsgrad eines Bestandes werden über den Simulationszeitraum beibehalten.

In den Fällen, in denen Datensätze wegen fehlender Informationen zur Höhe nicht bonitiert werden können, muss für die Fortschreibung eine Ertragsklasse exogen bestimmt werden. Insbesondere für Bestände der ersten Altersklasse, für die häufig weder Ertragstafelangaben existieren noch eine Mittelhöhe empirisch bestimmt werden kann, besteht die Notwendigkeit der Ertragsklassenzuweisung. Jedem Datensatz ohne berechnete Bonität wird die durchschnittliche Ertragsklasse derselben bzw. nächstmöglichen Altersklasse derselben Baumartengruppe im Landkreis zugeordnet. Ist dies nicht möglich, erhält der Datensatz die durchschnittliche Ertragsklasse der-

selben bzw. nächstmöglichen Altersklasse, berechnet über alle Baumartengruppen im Landkreis. Sollte die Berechnung einer durchschnittlichen Ertragsklasse auch auf diesem Weg nicht möglich sein, erhält der Datensatz die durchschnittliche Ertragsklasse derselben bzw. nächsthöheren Altersklasse im Bundesland. Mit diesem Vorgehen wird dem Umstand Rechnung getragen, dass jüngere Altersklassen in der Regel bessere Ertragsklassen aufweisen als ältere. Zudem wird berücksichtigt, dass die Standortvariabilität innerhalb eines Landkreises in der Regel geringer ist als die Variabilität der Standorte in einem Bundesland.

Tabelle 7: *Verwendete Ertragstafeln und Umtriebszeiten*

Baumarten- gruppe	Region	Ertragstafel	Umtriebs- zeit [Jahre]
Alh	Nord-West	Esche - schwache Durchforstung Wimmenauer 1919	120
Alh	Süd	Esche - schwache Durchforstung Wimmenauer 1919	130
Alh	Nord-Ost	Esche - schwache Durchforstung Wimmenauer 1919	120
Aln	Nord-West	Schwarzerle - starke Durchforstung - Mitscherlich 1945	80
Aln	Süd	Schwarzerle - starke Durchforstung - Mitscherlich 1945	80
Aln	Nord-Ost	Schwarzerle - starke Durchforstung - Mitscherlich 1945	80
Buche	Nord-West	Rotbuche - mäßige Durchforstung - Schober 1967	150
Buche	Süd	Rotbuche - mäßige Durchforstung - Schober 1967	140
Buche	Nord-Ost	DDR-Buchenertragstafel - Dittmar, Knapp, Lembcke 1983	150
Douglasie	Nord-West	Douglasie - mäßige Durchforstung - Schober 1956	90
Douglasie	Süd	Douglasie - mäßige Durchforstung - Schober 1956	100
Douglasie	Nord-Ost	Douglasie - mäßige Durchforstung - Schober 1956	100
Eiche	Nord-West	Eiche - mäßige Durchforstung - Jüttner 1955	190
Eiche	Süd	Eiche - mäßige Durchforstung - Jüttner 1955	180
Eiche	Nord-Ost	Eiche - Hochdurchforstung - Erteld 1961	180
Fichte	Nord-West	Fichte - mäßige Durchforstung - Wiedemann 1936/42	100
Fichte	Süd	Fichte - mittleres Ertragsniveau - Assmann-Franz 1963	110
Fichte	Nord-Ost	DDR-Fichtenertragstafel Bonitätssystem M - Wenk, Römisch, Gerold 1984	110
Kiefer	Nord-West	Kiefer - mäßige Durchforstung - Wiedemann 1943	140
Kiefer	Süd	Kiefer - mäßige Durchforstung - Wiedemann 1943	140
Kiefer	Nord-Ost	DDR-Kieferntragstafel - Lembcke, Knapp, Dittmar 1975	140
Lärche	Nord-West	europ. Lärche - mäßige Durchforstung - Schober 1946	130
Lärche	Süd	europ. Lärche - mäßige Durchforstung - Schober 1946	130
Lärche	Nord-Ost	europ. Lärche - mäßige Durchforstung - Schober 1946	130
Tanne	Nord-West	Tanne - mäßige Durchforstung - Hausser 1956	120
Tanne	Süd	Tanne - mäßige Durchforstung - Hausser 1956	130
Tanne	Nord-Ost	Tanne - mäßige Durchforstung - Hausser 1956	110

Die Regionen umfassen folgende Bundesländer:

Nord-West: SH, HH, NI, NW, HE, RP, SL

Süd: BW, BY

Nord-Ost: MV, BB, SN, ST, TH, BE

Bei der Fortschreibung wird der gemessene Vorrat um den laufenden Zuwachs aus der Ertragstafel erhöht und um das ausscheidende Volumen nach Ertragstafel verringert. Der ausscheidende Vorrat der Periode 2000 bis 2005 wird anhand seines Mitteldurchmessers, der ebenfalls der Ertragstafel entnommen wird, nach der Bestandessortentafel (SCHÖPFER, DAUBER, 1990, S. 241 ff.) auf die üblichen Sorten aufgeteilt. Die Sortierung erfolgt für Vor- und Endnutzungen nach den gleichen Tafeln. Während die Mitteldurchmesser für Endnutzungen den Ertragstafeln aber direkt entnommen werden können, müssen die Mitteldurchmesser für Vornutzungen zum Teil aus verschiedenen Ertragstafelgrößen hergeleitet werden.

Da für Plenterwälder keine Ertragstafeln existieren, wird die Fläche des Plenterwaldes in einem Landkreis auf die Baumarten, die den Plenterwald bilden, altersstufenweise flächenproportional verteilt. Für Unter- bzw. Nebenbestand sind ebenfalls keine Angaben über Zuwachs und Nutzung verfügbar. Sie werden aus der Potenzialberechnung ganz ausgeklammert.

Auswertungen der Bundeswaldinventur und des Datenspeichers Waldfonds zeigen, dass die bei den Landesforstverwaltungen und Waldbesitzervereinigungen erfragten Umtriebszeiten in der Praxis nicht strikt eingehalten werden. Zum Teil können Bestandesalter festgestellt werden, die erheblich über den genannten Umtriebszeiten liegen. Um diese Erscheinung abbilden zu können, werden Übergangswahrscheinlichkeiten im Modell implementiert. Die Wahrscheinlichkeit für eine Nutzung verläuft glockenförmig im Bereich um die angegebene Umtriebszeit. Die Parameter der Wahrscheinlichkeitsverteilung werden entsprechend dem Vorgehen von ENGLERT, SASSE (1994, S. 10 ff.) auf der Basis der Untersuchung von GEROLD (1986, S. 130 ff.) berechnet.

2.3.1.4 Simulationszeitraum

Das Energieholzpotenzial wird für den fünfjährigen Zeitraum 2000 bis 2005 ermittelt und in Jahreswerte umgerechnet.

2.3.2 Geoinformationen

2.3.2.1 Stadt- und Landkreise, Raumordnungsregionen

Die Grenzen der Stadt- und Landkreise in Deutschland sind als digitalisierter Datensatz der Firma ESRI verfügbar (Stichtag 31.12.1996). Die Zuordnung der Waldinformationen zu den Stadt- bzw. Landkreisen ist für die alten Bundesländer problemlos möglich, da zu jedem Stichprobenpunkt der Bundeswaldinventur auch der zugehörige Kreis erfasst wurde. Für die neuen Bundesländer ist es notwendig, die Grenzen der Forstämter bzw. Oberförstereien (Stichtag 1.1.1993) mit den heutigen Kreisgrenzen zu verschneiden. Für die Ergebnisdarstellung werden die Stadt- und Landkreise zu Raumordnungsregionen (BBR, 1998, Karte 1) zusammengefasst.

2.3.2.2 Topographie

Digitales Geländemodell (DGM) 250

Wälder in Steillagen werden aus verschiedenen Gründen, insbesondere der hohen Ernte- und Bringungskosten sowie der hohen Erosionsgefahr, in der Praxis keiner geregelten Nutzung unterzogen. Der Einsatz vollmechanisierter Verfahren ist auf mehr oder weniger ebene Gebiete beschränkt. Zur Abbildung dieser durch die Topographie bedingten Nutzungseinschränkungen müssen die kreisbezogenen Daten zur forstlichen Nutzung mit einem digitalen Geländemodell überlagert werden. Als Geländemodell kann das DGM 250 des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie eingesetzt werden. Das DGM 250 bildet Höhenunterschiede in einem über Deutschland gelegenen 200 m x 200 m Raster in Ein-Meter-Höhenstufen ab.

Bei der Anwendung des digitalen Geländemodells muss bedacht werden, dass sich Steigungen nur für fixe Punkte, die jeweils 200 m voneinander entfernt sind, berechnen lassen. Die berechnete Steigung ist daher lediglich der Mittelwert einer 200 m langen Strecke. Innerhalb dieser 200 m können vom Mittelwert mehr oder weniger stark abweichende Geländeneigungen auftreten, die mit dem digitalen Geländemodell nicht abgebildet werden können. In der Regel werden die tatsächlich auftretenden Neigungen mit dem Mittelwert aus dem 200 m x 200 m Raster unterschätzt. Aus diesem Grund werden die Ergebnisse der Geländeklassenausscheidung in einigen

Landkreisen mit charakteristischer Topographie überprüft. Die Grenze von 60 % Steigung für Nutzungsausschluss kann beibehalten werden. Um jedoch Traufe oder markante Taleinschnitte mit dem digitalen Geländemodell abbilden zu können, wird die Grenze zwischen den Geländeklassen 1 und 2 von 30 % auf 21 % gesenkt.

CORINE-Land-Cover

Die Datengrundlage (BWI und DSWF) erlaubt es nicht, Aussagen zur räumlichen Lage von Wald innerhalb eines Stadt- oder Landkreises zu treffen. Um die Verteilung von Wald auf die unterschiedlichen Geländeklassen nicht pauschal vornehmen zu müssen, wird die Waldverteilung aus der CORINE (Co-ordinated Information of the Environment)-Land-Cover mit den Kreisgrenzen sowie dem digitalen Geländemodell verschnitten. Auf diesem Weg kann der Anteil an Wald und damit auch der Anteil an Nutzungspotenzial ermittelt werden, der aus topographischen Gründen ungenutzt bleibt. Implizit gilt dabei jedoch die vereinfachende Annahme, dass die Baumarten- und Altersklassenstruktur über die unterschiedlichen Höhenstufen gleich bleiben. In diesem Punkt wäre eine genauere Abbildung der Waldverteilung im Modell wünschenswert. Die CORINE-Land-Cover wurde durch Auswertung von Satellitendaten (Landsat TM 5) aus in den Jahren 1989 bis 1992 erstellt.

2.3.2.3 Nationalparke und Biosphärenreservate

Neben geländebedingten Einschränkungen unterliegt die Nutzung von Holz teilweise auch institutionellen oder rechtlichen Restriktionen. Sowohl in Nationalparken als auch in Biosphärenreservaten sind Kernzonen ausgewiesen, in denen land- und forstwirtschaftliche Nutzung untersagt ist. Die Größe der Kernzonen sowie deren Waldanteil variieren vor allem zwischen den einzelnen Nationalparken erheblich. Für Biosphärenreservate gilt die Vorgabe, dass mindestens 3 % der Gesamtfläche als Kernzone ausgewiesen sein muss (DEUTSCHES NATIONALKOMITEE FÜR DAS UNESCO-PROGRAMM MAB, 1996, S. 7).

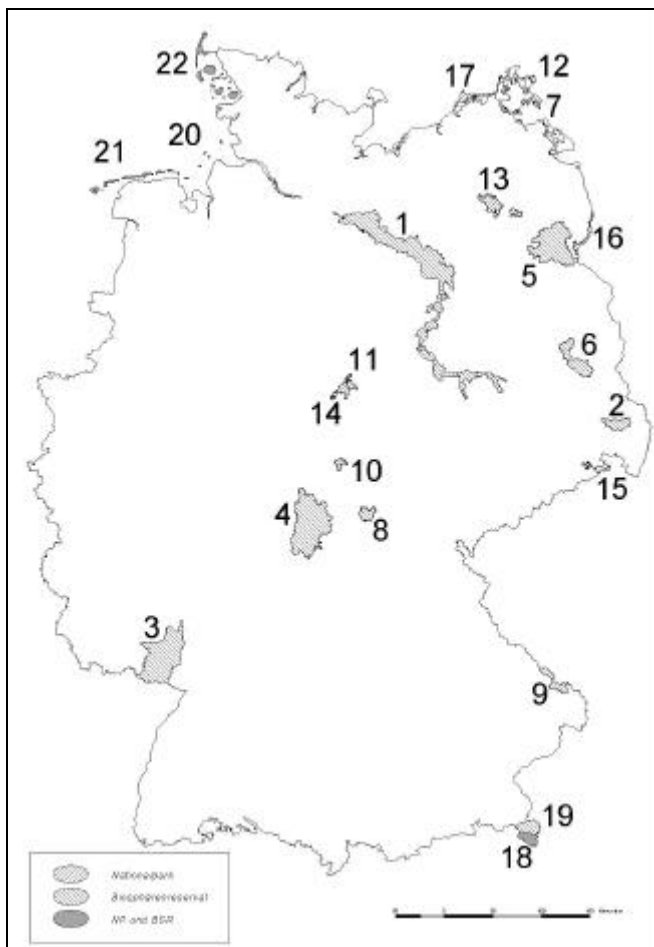
Für die vorliegende Untersuchung wurden digitalisierte Datensätze zu Lage und Grenzen der Nationalparke und Biosphärenreservate vom Bundesamt für Naturschutz zur Verfügung gestellt. Durch Verschneidung mit den CORINE-Land-Cover-Daten ist es damit möglich, den Waldanteil in den jeweiligen Nationalparken und Biosphärenreservat zu bestimmen. Die Datensätze enthalten jedoch keine Angaben zur Lage oder Größe der Kernzonen.

Angaben zur Waldfläche in den Kernzonen der Nationalparke können SCHLOTT (2000, S. 160) entnommen werden. Da die Baumarten- und Altersklassenstruktur eines Landkreises nicht weiter regionalisiert werden kann, wird für die Kernzonen die gleiche Waldstruktur unterstellt, wie sie für den Landkreis insgesamt ermittelt wurde.

Eine Übersicht über die Größe und den Waldanteil von Kernzonen in Biosphärenreservaten in Deutschland existiert unter anderem deshalb nicht, weil in einigen Biosphärenreservaten die Planungen zur Zoneneinteilung noch nicht abgeschlossen sind. Für Biosphärenreservate wird ein Anteil der Kernzone an der Gesamtfläche in Höhe von 4 % angenommen. Es wird unterstellt, dass die Kernzonen die gleiche Landnutzungsformenverteilung besitzen wie die jeweiligen Biosphärenreservate.

Die berücksichtigten Nationalparke und Biosphärenreservate sind in Abbildung 4 dargestellt und in der Tabelle 8 aufgelistet.

Abbildung 4: Nationalparke und Biosphärenreservate in Deutschland



Quelle: Bundesamt für Naturschutz

Tabelle 8: Nationalparke und Biosphärenreservate, Waldfläche in den Kernzonen der Nationalparke

ID	Biosphärenreservat	Nationalpark	Waldfläche in den Kernzonen (ha)
1	Flusslandschaft Elbe		
2	Oberlausitzer Heide- und Teichlandschaft		
3	Pfälzerwald		
4	Rhön		
5	Schorfheide-Chorin		
6	Spreewald		
7	Südost-Rügen		
8	Vessertal-Thüringer Wald		
9		Bayerischer Wald	10.690
10		Hainich	2.267
11		Hochharz	1.266
12		Jasmund	1.112
13		Müritz	1.052
14		Nationalpark Harz	4.718
15		Sächsische Schweiz	3.345
16		Unteres Odertal	175
17		Vorpommersche Boddenlandschaft	2.300
18		Berchtesgaden	5.460
19	Berchtesgaden		
20	Hamburgisches Wattenmeer	Hamburgisches Wattenmeer	0
21	Niedersächsisches Wattenmeer	Niedersächsisches Wattenmeer	0
22	Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer	Schleswig-Holsteinisches Wattenmeer	0

Quelle: Bundesamt für Naturschutz, SCHLOTT (2000, S. 160)

3 Ergebnisse

Die auf der Ebene der Stadt- und Landkreise berechneten Ergebnisse werden aus statistischen Gründen zu größeren räumlichen Einheiten, den Raumordnungsregionen (BBR, 1998, Karte 1), zusammengefasst. Die Energieholzpotenziale und Bereitstellungskosten in den Raumordnungsregionen sind von den Anteilen der eingesetzten Verfahren abhängig. Die Verfahrenswahl wird, abgesehen von dem fest vorgegebenen Anteil motormanueller Aufarbeitung, im Wesentlichen von den topographischen Verhältnissen bestimmt. Je nach Baumart, Durchmesserklasse und gewähltem Verfahren umfasst das Energieholzpotenzial auch die Nadelmasse. Die Potenziale sind die unter den zur Zeit vorherrschenden forstlichen Zielsetzungen und gegebenen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen in der Forst- und Holzwirtschaft für die thermische Verwertung maximal verfügbaren Mengen an Biomasse aus dem Wald. Zur Beantwortung der Frage, inwieweit mit einer Mobilisierung des Potenzials gerechnet werden kann, sind die Bereitstellungskosten heranzuziehen.

Die Kosten für die Bereitstellung von Hackschnitzeln liegen nach Baumarten, Altersklassen sowie nach Schwachholz und Waldrestholz getrennt vor. Waldrestholz wird zudem danach unterschieden, ob Hackschnitzel vollmechanisiert gewonnen werden können oder nicht. Diese vergleichsweise feine Untergliederung gestattet es, das aus dem Potenzial erwartbare Energieholzaufkommen in Abhängigkeit von den Preisen für Hackschnitzel herzuleiten. Durch die Berücksichtigung durchschnittlicher Transportkosten gelten die Kosten frei Werk. Sie können daher direkt mit den Preisen für Hackschnitzel verglichen werden. Mögliche Rückwirkungen des Energieholzangebotes auf den Preis für Hackschnitzel können mit dem vorliegenden Modell nicht abgebildet werden.

Tabelle 9: Energieholzpotenzial nach Baumartengruppen in Abhängigkeit von der unteren Aufarbeitungsgrenze (8 cm, 12 cm) in t_{atro}

Hackschnitzel aus	Baumartengruppe				Gesamt
	Eiche	Buche Alh Aln	Fichte Tanne Douglasie	Kiefer Lärche	
Schwachholz (8 cm)	350.771	1.487.391	3.156.681	1.999.714	6.994.558
Schwachholz (12 cm)	211.732	905.606	1.965.533	1.184.421	4.267.292
Waldrestholz	584.032	3.166.389	4.091.108	1.753.074	9.594.602
Gesamt (8 cm)	934.803	4.653.780	7.247.788	3.752.788	16.589.159
Gesamt (12 cm)	795.763	4.071.994	6.056.641	2.937.496	13.861.894

Tabelle 9 weist ein Potenzial an Energieholz für die Bundesrepublik Deutschland in Höhe von knapp 14 Mio. t_{atro} bei 12 cm unterer Aufarbeitungsgrenze bzw. in Höhe von ca. 16,5 Mio. t_{atro} bei 8 cm unterer Aufarbeitungsgrenze auf. Das Potenzial gliedert sich in knapp 7 Mio. t_{atro} (8cm) bzw. 4,3 Mio. t_{atro} (12 cm) Schwachholz und 9,5 Mio. Waldrestholz. Der Anteil von Waldrestholz am Energieholzpotenzial ist damit deutlich höher als derjenige von Schwachholz. Die Vergrößerung der unteren Aufarbeitungsgrenze von 12 cm auf 8 cm führt zu einer Erhöhung des Potenzials um etwa 2,5 Mio. t_{atro} . Eine Mobilisierung dieses Potenzials verhindern jedoch weitge-

hend die in diesem Durchmesserbereich entsprechend dem Stück-Masse-Gesetz hohen Bereitstellungskosten. Nach Baumarten gegliedert zeigt sich ein mit den Flächen- und Vorratsverhältnissen übereinstimmendes Bild. Das höchste Energieholzpotenzial besitzt die Baumartengruppe Fichte. Buche, Alh und Aln folgen mit knapp 1 Mio. t_{atro} Vorsprung vor Kiefer und Lärche. Das mit Abstand geringste Energieholzpotenzial weist die Baumartengruppe Eiche auf.

Abbildung 5: Energieholzpotenzial bei einer unteren Aufarbeitungsgrenze von 8 cm nach Raumordnungsregionen; in t_{atro}

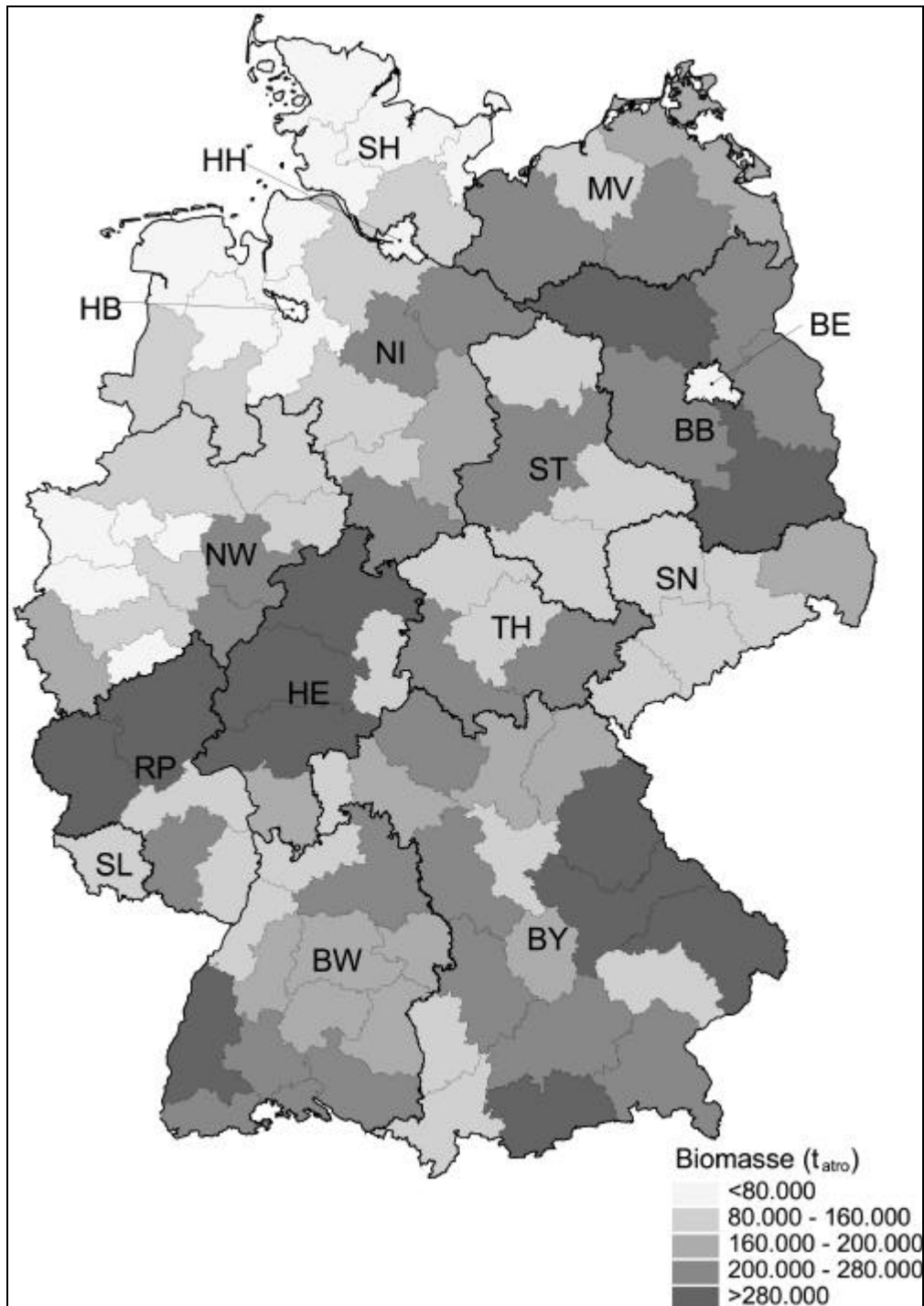


Abbildung 5 zeigt die regionale Verteilung des Energieholzpotenzials bei einer unteren Aufarbeitungsgrenze von 8 cm. Die Raumordnungsregionen mit den höchsten Energieholzpotenzialen liegen erwartungsgemäß in den Bundesländern und Gegenden mit hohen Waldanteilen. Die höchsten absoluten Energieholzpotenziale finden sich demnach in Brandenburg, Hessen und Rheinland-Pfalz, im Schwarzwald, im Alpenraum und in Ostbayern. Nur wenig Potenzial an Energieholz besitzen der Großteil Schleswig-Holsteins, der Nordwesten Niedersachsens sowie Teile Nordrhein-Westfalens. Bei der Interpretation der Karte ist zu bedenken, dass die Raumordnungsregionen nicht gleich groß sind und geringere absolute Potenziale allein schon durch die Größe der Regionen bedingt sein können. Eine vollständige Auflistung der Ergebnisse nach Raumordnungsregionen enthält Tabelle A1 im Anhang.

Die Aufteilung des regionalen Energieholzpotenzials auf Schwachholz und Waldrestholz zeigt Abbildung A1 im Anhang. Hohe Schwachholzanteile weisen vor allem die Bundesländer mit linkssteiler Altersklassenstruktur wie Brandenburg, Niedersachsen, Sachsen-Anhalt oder Sachsen auf. Hohe Waldrestholzanteile am Energieholzpotenzial finden sich hingegen in den Ländern mit vorratsreicheren Wäldern z. B. im Süden Deutschlands.

Die Höhe des erwartbaren Energieholzaufkommens ist abhängig von den Preisen für Hackschnitzel. Im Folgenden wird das Energieholzaufkommen für unterschiedliche Hackschnitzelpreise dargestellt. Es werden Preise von 90, 120, 150 und 180 DM/t_{atro} unterschieden. Das Aufkommen setzt sich jeweils nur aus den Teilen des Potenzials zusammen, die kostendeckend bereitgestellt werden können.

Abbildung 6: Energieholzaufkommen unterteilt nach Schwachholz (untere Aufarbeitungsgrenze 8 cm und 12 cm) und Waldrestholz in Abhängigkeit vom Preis für Hackschnitzel sowie ohne Preisgrenze (Gesamt); in t_{atro}

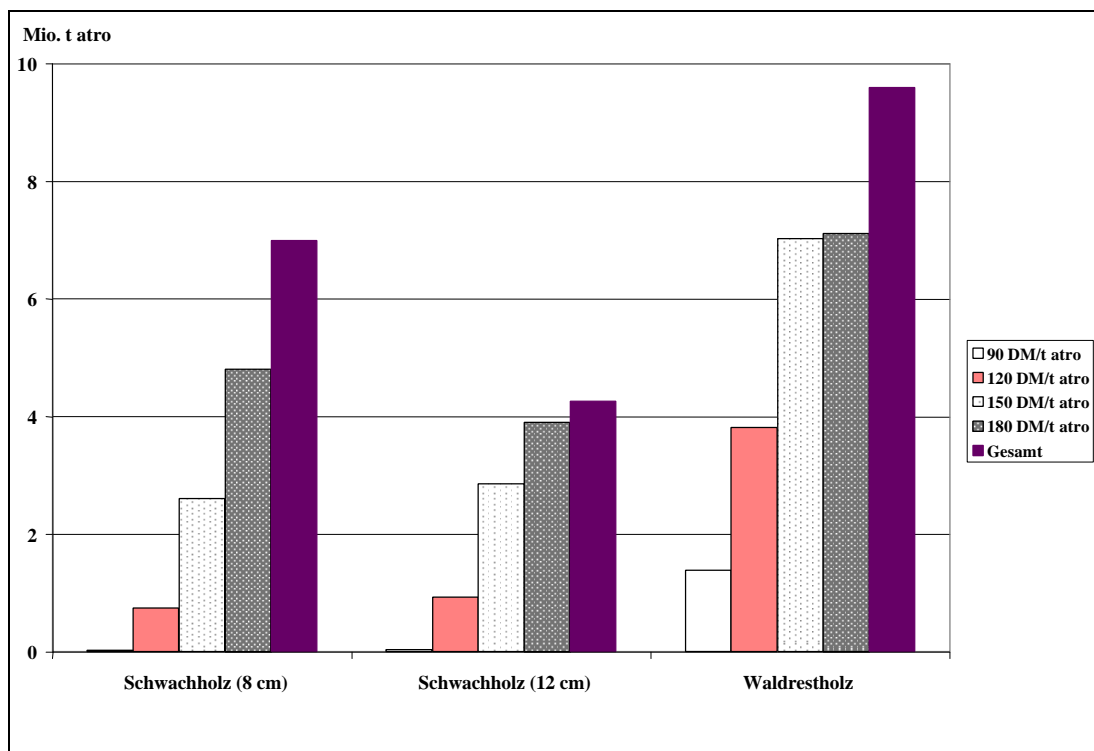


Abbildung 6 zeigt ein zunächst erwartetes Bild. Mit zunehmenden Preisen steigt das Energieholzaufkommen an. Die jeweils rechte Säule deckt sich mit den Zahlen in der Spalte „Gesamt“ in Tabelle 9. Die Entwicklung des Aufkommens aus Schwachholz verläuft für die beiden Szenarien bis zum Preis von 150 DM/t_{atro} nahezu gleich. Für einen Preis von 180 DM/t_{atro} liegt das Aufkommen bei 8 cm unterer Aufarbeitungsgrenze etwas höher. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich beim Vergleich der Säulen ohne Preisbeschränkung („Gesamt“). Das deutet darauf hin, dass aus den durch die Absenkung der unteren Aufarbeitungsgrenze von 12 cm auf 8 cm zusätzlich berücksichtigten Beständen Hackschnitzel erst ab Preisen von ca. 180 DM/t_{atro} und mehr angeboten werden können. Aufgrund der hohen Aufarbeitungskosten in diesem Durchmesserbereich ist dieses Ergebnis plausibel. Für beide Schwachholz-szenarien erweist sich ein Preis von 150 DM/t_{atro} als untere Schwelle für ein Energieholzaufkommen in nennenswertem Umfang. Bei Waldrestholz führt bereits der Preissprung von 90 DM/t_{atro} auf 120 DM/t_{atro} zu einem deutlichen Anstieg des Energieholzaufkommens. Bei einem Preis von 150 DM/t_{atro} steigt das Aufkommen aus Waldrestholz noch einmal um etwa 80 % an.

Das vom Preis für Hackschnitzel abhängige Aufkommen an Biomasse aus Schwachholz und Waldrestholz kann weiter nach Baumarten differenziert werden. In den Abbildungen A 2 bis A4 im Anhang ist das Energieholzaufkommen nach Baumarten und Preisen gegliedert dargestellt. Es ist auffällig, dass der Anstieg des Energieholzaufkommens für die einzelnen Baumarten weniger kontinuierlich verläuft als bei einer Betrachtung über alle Baumarten hinweg. Die Laubbaumarten weisen bereits bei niedrigeren Preisen als die Nadelbaumarten einen deutlichen Anstieg im Energieholzaufkommen auf. Bei Schwachholz zeigt sich dieser Anstieg bei einem Preis von 120 DM/t_{atro}, bei Waldrestholz bei einem Preis von 90 DM/t_{atro}. Dieses Ergebnis begründet sich mit der höheren Holzdicke der Laubbaumarten, insbesondere der Baumarten Eiche und Buche. Da die Kosten der Hackschnitzelbereitstellung vom Volumen abhängen, die Preise jedoch auf die Masse bezogen sind, ist bei Baumarten mit höherer Holzdicke bei gleichem Volumen (Srm) ein höherer Preis zu erzielen. Umgekehrt kann die gleiche Masse zu niedrigeren Kosten bereitgestellt werden. In der Abbildung für Waldrestholz (A4) spiegelt sich wider, dass innerhalb der verschiedenen Verfahren jeweils ein fester Preis für die Aufarbeitung von Waldrestholz zu Hackschnitzeln unterstellt wird. Eine Unterschreitung dieser Preise führt bei den jeweiligen Verfahren zum vollständigen Verzicht auf Hackschnitzelgewinnung, eine Überschreitung führt zur Aufarbeitung der gesamten Menge. Die in Abbildung A4 zu erkennenden Unterschiede im Energieholzaufkommen einer Baumart resultieren aus den unterschiedlichen Kosten der eingesetzten Verfahren.

Die regionale Verteilung des Energieholzaufkommens ist beispielhaft für Hackschnitzelpreise in Höhe von 120 DM/t_{atro} und 180 DM/t_{atro} in den Abbildungen A5 und A6 im Anhang dargestellt. Das Aufkommen an Energieholz, das zu einem Preis von höchstens 120 DM/t_{atro} bereitgestellt werden kann, ist gering. Es beläuft sich mit etwa 4,5 Mio. t_{atro} auf nur $\frac{1}{4}$ des berechneten Gesamtpotenzials. Höhere Aufkommen liegen aufgrund des bereits erwähnten Kostenvorteils schwerer Holzarten in den laubholzreichen Gegenden in Hessen, Rheinland-Pfalz und Nordbayern. Das bei einem Hackschnitzelpreis von 120 DM/t_{atro} kostendeckend bereitzustellende Energieholz in Brandenburg und Teilen Mecklenburg-Vorpommerns dürfte überwiegend aus schwachen Kiefernbeständen stammen, deren mittlere Durchmesser nahe der Grenze zur stofflichen Verwertung bei etwa 15 cm liegen und damit eine günstige Aufarbeitung zu Hackschnitzeln ermöglichen. Zudem gestattet die Topographie in Brandenburg und Mecklenburg-Vorpommern den Einsatz vollmechanisierter Verfahren auf großer Fläche. Die Erhöhung des Preises für Hackschnitzel um 60 DM/t_{atro} auf 180 DM/t_{atro} bewirkt eine deutliche Zunahme des Energieholzaufkommens auf knapp 12 Mio. t_{atro}. Dessen Verteilung auf die Raumordnungsregionen ist der Verteilung des Energieholzpotenzials bereits sehr ähnlich.

Abbildung 7: Energieholzaufkommen bezogen auf das Energieholzpotenzial in Abhängigkeit vom Preis für Hackschnitzel; nur Schwachholz (untere Aufarbeitungsgrenze 8 cm)

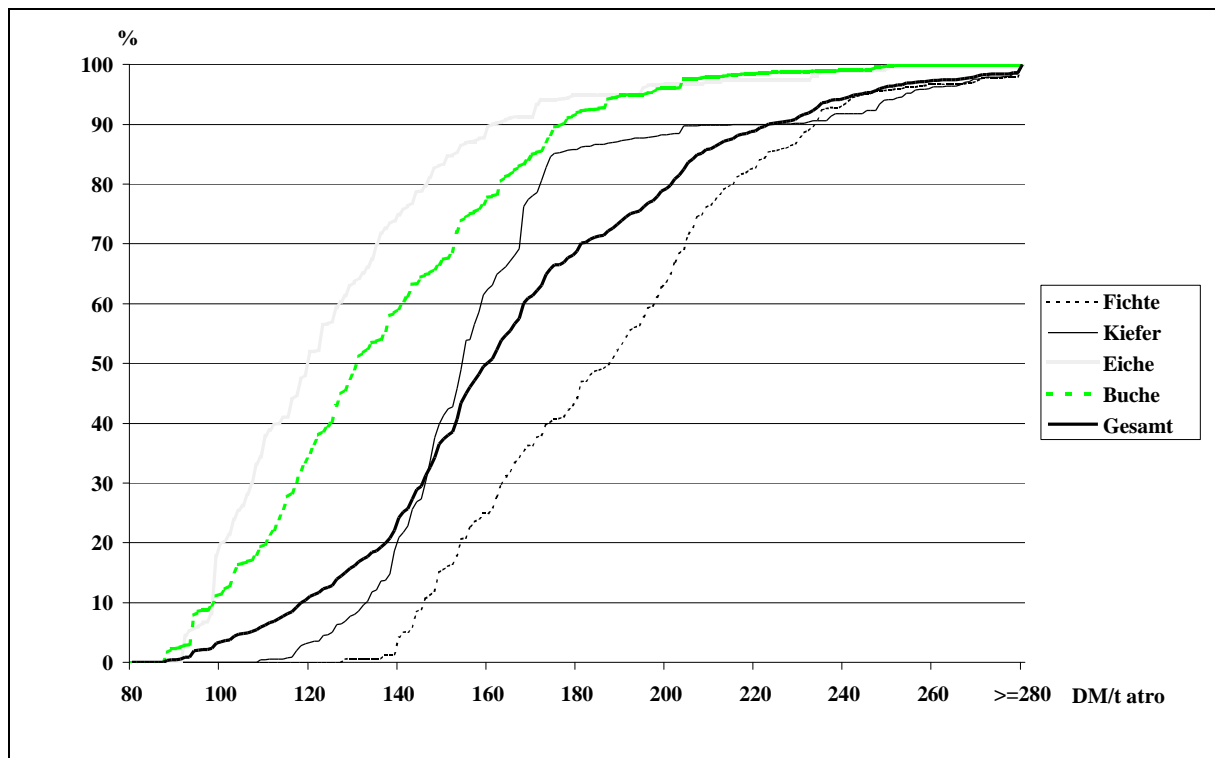
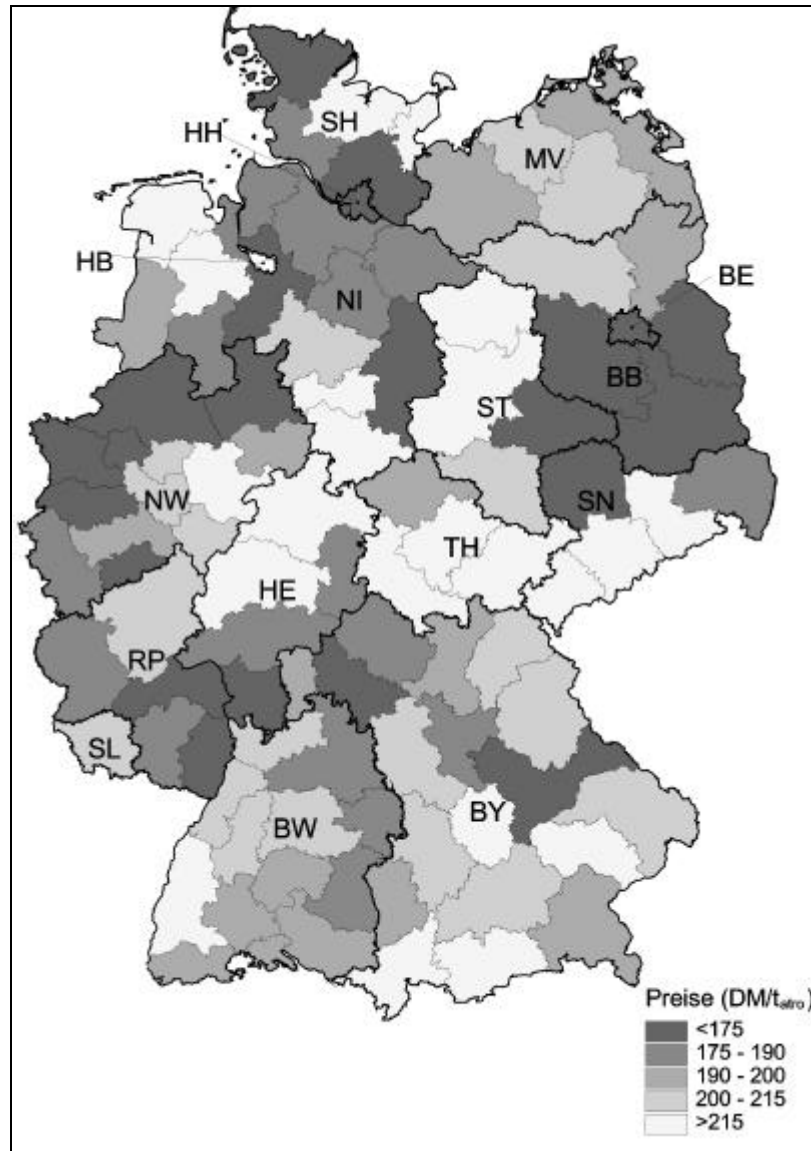


Abbildung 7 zeigt für Schwachholz (untere Aufarbeitungsgrenze 8 cm) der vier Baumartengruppen Eiche, Buche, Fichte und Kiefer sowie für deren Summe den Anteil am Energieholzpotenzial, der in Abhängigkeit vom Preis für Hackschnitzel kostendeckend bereitgestellt werden kann. Die Kurven der vier Baumartengruppen verlaufen unterschiedlich. Vergleichbare Anteile am Energieholzpotenzial können bei Eiche und Buche durchwegs zu niedrigeren Kosten bereitgestellt werden als bei Kiefer und insbesondere bei Fichte. Auch in diesem Ergebnis spiegeln sich die unterschiedlich hohen Holzdichten und deren Auswirkungen auf die Kosten der Hackschnitzelgewinnung wider. Die Kurve für das Gesamtergebnis liegt zwischen denjenigen der Baumartengruppen. Die größere Nähe zu den Kurven der Nadelbaumarten entspricht dabei der Verteilung des Potenzials auf die Baumartengruppen. Alle fünf Kurven weisen im Bereich von etwa 30 % bis 70 % Anteil am Energieholzpotenzial einen steilen Verlauf auf; die Preiselastizität des Energieholzangebotes ist in diesem Mengenbereich hoch. Sie beträgt für die Gesamtkurve in der Mitte des betrachteten Bereiches etwa 4,5. Mit zunehmender Annäherung des Aufkommens an das Potenzial nimmt die Preiselastizität ab; das Energieholzangebot wird preisunelastisch. Zur Mobilisierung der letzten 10 % bis 20 % des Potenzials müssen die Preise stark ansteigen. Aus Abbildung 7 lässt sich der Marktpreis ablesen, der für die Bereitstellung einer bestimmten Hackschnitzelmenge bezahlt werden muss. Um beispielsweise 80 % des Potenzials zu mobilisieren, muss der Preis für Hackschnitzel ca. 200 DM/t_{atro} betragen.

Diese Aussage gilt jedoch nur unter der Annahme eines vollkommenen Marktes für Hackschnitzel. In ökonomischen Untersuchungen muss regelmäßig in Kauf genommen werden, dass die idealisierende Annahme eines vollkommenen Marktes nur bedingt zutrifft. Die Existenz von Transportkosten und deren hohe Bedeutung für den Hackschnitzelpreis frei Werk verletzen die Homogenitätsbedingung eines vollkommenen Marktes. Untersuchungen über die räumliche Abgrenzung von Hackschnitzelmärkten in Deutschland existieren aber nicht. Entsprechend der An-

nahme kurzer Transportdistanzen in den Kalkulationen der Bereitstellungskosten frei Werk werden die Preise, die zur Mobilisierung von 80 % des Potenzials an Energieholz aus Schwachholz bezahlt werden müssen, nach Raumordnungsregionen getrennt ermittelt und dargestellt (Abbildung 8, Tabelle A1 im Anhang).

Abbildung 8: Zur Mobilisierung von 80 % des Potenzials an Energieholz aus Schwachholz (untere Aufarbeitungsgrenze 8 cm) zu zahlende Preise; nach Raumordnungsregionen



In Übereinstimmung mit den Ergebnissen aus Abbildung A5 weisen die Raumordnungsregionen mit hohem Laubholzanteil oder ebenem Gelände niedrige Preise auf, zu denen 80 % des Potenzials an Biomasse aus Schwachholz (untere Aufarbeitungsgrenze 8 cm) kostendeckend bereitgestellt werden kann. Zusätzlich zu den bereits in Zusammenhang mit Abbildung A5 diskutierten Gebieten sind auch im nördlichen Nordrhein-Westfalen, im westlichen Niedersachsen sowie in Schleswig-Holstein 80 % des Potenzials zu Preisen mobilisierbar, die niedriger sind als der Durchschnitt für Deutschland insgesamt. Für diese Regionen können die niedrigen Preise mit den guten Einsatzmöglichkeiten für vollmechanisierte Bereitstellungsverfahren, mit dem hohen Anteil an Laubholzbeständen sowie mit dem hohen Anteil an Beständen der zweiten und dritten

Altersklasse begründet werden. Der Umstand, dass das westliche Niedersachsen sowie Schleswig-Holstein nicht in Abbildung A5 hervortreten, liegt vor allem daran, dass das Gesamtpotenzial in den entsprechenden Raumordnungsregionen nur gering ist.

4 Diskussion

Mit dem vorliegenden Modell werden auf regionaler Ebene das Energieholzpotenzial zur thermischen Verwertung aus Waldholz sowie die für die Bereitstellung erforderlichen Kosten für die Bundesrepublik Deutschland berechnet. Die Untersuchung basiert auf den Daten der Bundeswaldinventur und des Datenspeichers Waldfonds. Für die Wachstums- und Nutzungsberechnung dient ein auf Ertragstafeln aufbauendes Fortschreibungsmodell. Durch dessen Kopplung mit einem Geoinformationssystem können Nutzungseinschränkungen aus topographischen und naturschutz-rechtlichen Gründen berücksichtigt werden. Die Bereitstellungskosten werden für drei verschiedene Verfahren - vollmechanisiert, teilmechanisiert und motormanuell - berechnet und beinhalten auch durchschnittliche Transportkosten zum Heiz(kraft)werk.

Auf der Basis zahlreicher notwendiger Annahmen berechnet sich das Potenzial an Energieholz auf knapp 14 Mio. t_{atro} bei einer unterstellten unteren Aufarbeitungsgrenze von 12 cm bzw. ca. 16,5 Mio. t_{atro} bei einer unterstellten unteren Aufarbeitungsgrenze von 8 cm. Das Potenzial an Energieholz zur thermischen Verwertung aus Waldrestholz beträgt für Deutschland 9,5 Mio. t_{atro} . Das Potenzial an Energieholz zur thermischen Verwertung aus Schwachholz ist geringer. Wird Schwachholz ab einem mittleren Durchmesser von 12 cm zu Hackschnitzeln verarbeitet, umfasst das Potenzial gut 4 Mio. t_{atro} . Bei einer unteren Aufarbeitungsgrenze von 8 cm erhöht sich das Potenzial auf 7 Mio. t_{atro} . Die Verteilung des Potenzials an Energieholz zur thermischen Verwertung auf die Raumordnungsregionen deckt sich sowohl mit der Waldverteilung als auch mit der Baumarten- und Altersklassenstruktur in Deutschland. Bei einem Hackschnitzelpreis von 160 DM/ t_{atro} lässt sich bei einer Betrachtung für Deutschland insgesamt etwa die Hälfte des Potenzials mobilisieren, bei einem Preis von 200 DM/ t_{atro} etwa 80 %. Die Preise, die für eine Mobilisierung von 80 % des Potenzials bei einer Differenzierung nach Raumordnungsregionen bezahlt werden müssen, schwanken zwischen 150 DM/ t_{atro} und 260 DM/ t_{atro} .

Im Ergebnis der vorliegenden Untersuchung ist nicht berücksichtigt, dass Brennholz aus dem Wald bereits in nennenswertem Umfang genutzt wird. Zum einen liegt eine Abschätzung des Brennholzverbrauchs nur auf Bundesebene vor. Zum anderen wird Schichtholz, ein Sortiment, das hauptsächlich an die Holzwerkstoff- und Papierindustrie verkauft wird und deshalb in der vorliegenden Potenzialberechnung nicht erfasst ist, zum Teil ebenfalls als Brennholz genutzt. Die aus dem Energieholzpotenzial zusätzlich zu bereits bestehenden Nutzungen verfügbare Teilmenge lässt sich daher nicht genau quantifizieren.

Gegenüber früheren Potenzialschätzungen stehen für die vorliegende Abschätzung des Energieholzpotenzials in Deutschland deutlich verbesserte Datengrundlagen zur Verfügung. DAUBER, KREUTZER (1979, S. 289 f.) sind bei ihrer Potenzialermittlung auf die Einschlagsstatistik für Deutschland angewiesen und müssen damit die hohe Ungenauigkeit dieser Quelle in Bezug auf den Einschlag im Privatwald in Kauf nehmen. Zur Berücksichtigung der sich akkumulierenden Durchforstungsreserven als Energieholzpotenzial steht nur die bayerische Holzaufkommensprognose zur Verfügung. Deren Hochrechnung auf Deutschland erhöht die Ungenauigkeit der Potenzialschätzung zusätzlich. Auch KRAMER, KRÜGER (1981, S. 33) können die Nutzungsmöglichkeit forstlicher Biomasse in der Bundesrepublik Deutschland nur auf Basis der Daten der Forsterhebung 1961 berechnen. Regionale Differenzierungen, auch im Hinblick auf Nutzungseinschränkungen, sind auf Grundlage dieser Daten nicht möglich.

Jüngere Untersuchungen zum forstlichen Energieholzpotenzial (z. B. HASCHKE, 1998, S. 806) basieren ebenfalls auf den Ergebnissen der Bundeswaldinventur und des Datenspeichers Wald-

fonds sowie auf der darauf aufbauenden Prognose des potenziellen jährlichen Rohholzaufkommens in Deutschland (POLLEY, SASSE, ENGLERT, 1996). HASCHKE (1998, S. 806) schätzt das neben der stofflichen Verwendung verfügbare jährliche Energieholzpotenzial auf 34 Mio. m³. Damit liegt seine Schätzung etwas über den Ergebnissen dieser Untersuchung, die, je nach Behandlung der Nadelmasse, umgerechnet etwa 25 bis 30 Mio. m³ betragen. Das höhere Energieholzpotenzial HASCHKES begründet sich vor allem darin, dass HASCHKE aus Holzeinschlagsstatistiken Ausschöpfungsgrade für Stamm- und Industrieholz berechnet und in der Vergangenheit nicht ausgeschöpftes Stamm- und Industrieholzpotenzial dem Energieholzpotenzial zuweist. HASCHKE verzichtet darauf, die Kosten für die Bereitstellung der 34 Mio. m³ zu ermitteln. Auch GROSSE, BEMMANN (1999, S. 480 ff.) stellen Angebotspotenzial und Nachfrage nach Holz zur energetischen und stofflichen Nutzung in den ostdeutschen Bundesländern einander gegenüber, ohne Bereitstellungskosten oder Marktpreise in die Gegenüberstellung mit einzubeziehen. Eine Studie, die sowohl Aufkommen als auch Aufarbeitungskosten zum Inhalt hat, ist auf das Bundesland Sachsen beschränkt (BEMMANN et al., 1997, S. 706 ff.). Sie weist, angesichts niedriger kalkulierter Lohnkosten und der Berechnung frei Waldstraße, geringere Kosten je t_{atro} aus. Für einen weiteren Ergebnisvergleich eignet sich die Studie vor allem wegen der sehr beispielhaften Annahmen über die Zusammensetzung des Energieholzpotenzials kaum.

Trotz der besseren Datengrundlage, der Einbeziehung regionaler geographischer Informationen sowie der Integration verschiedener Aufbereitungsverfahren und deren Kosten in die Analyse besteht für zukünftige Untersuchungen Erweiterungs- und Verbesserungspotenzial.

Zu den vordringlichen Verbesserungsvorschlägen gehört die Aufgabe der festen, für alle Baumarten und Landkreise gültigen Grenze zwischen stofflicher und thermischer Verwertung. Ein Bestandesmitteldurchmesser von 16 cm als Untergrenze für die Nachfrage der Holzwerkstoff- und Papierindustrie, unabhängig von Baumart und Transportentfernung zur nächstgelegenen Produktionsstätte, kann nur ein sehr grober Anhalt für tatsächliche Konkurrenzbeziehungen sein. Die Berücksichtigung von Industriestandorten, Transportentfernungen sowie baumartenspezifischer Nachfrage wäre eine erstrebenswerte Verfeinerung des Modells.

Bei der Interpretation der Bereitstellungskosten sowie der bei unterschiedlichen Hackschnitzelpreisen zu erwartenden Energieholzaufkommen sind die Annahmen zu bedenken, unter denen die Kosten berechnet werden. Die in Ermangelung genauere Kenntnisse der regionalen Waldeigentumsverhältnisse sowie der Opportunitätskosten der Waldeigentümer erfolgte Festlegung auf einen Anteil für motormanuelle Aufarbeitung in Höhe von pauschal 10 % ist nicht zwingend. Eine Variation dieses Anteils würde eine Veränderung der Bereitstellungskosten und damit auch eine Veränderung des vom Preis für Hackschnitzel abhängigen Energieholzaufkommens bewirken. Die starke Bevorzugung vollmechanisierter Hackschnitzelbereitstellung gegenüber teilmechanisierten Verfahren erklärt sich aus den der Kalkulation zugrunde liegenden, in der Logistik stärker gebrochenen teilmechanisierten Verfahren. Neuere, effizientere teilmechanisierte Bereitstellungsverfahren wecken die Hoffnung auf niedrigere Bereitstellungskosten für Hackschnitzel. Mit deren Berücksichtigung würde der in dieser Untersuchung unterstellte Verfahrensmix eine Veränderung erfahren müssen.

Für weitere Regionalanalysen ist eine Verbreiterung der naturalen Datengrundlage vor allem für die alten Bundesländer vordringlich. Die für die alten Bundesländer verfügbaren Daten aus der Bundeswaldinventur sind Stichprobendaten, die mit dem Ziel erhoben wurden, zuverlässige Informationen über Fläche, Vorrat und Struktur des Waldes auf der Ebene von Bundesländern zu erhalten. Sie ermöglichen die Abbildung der tatsächlichen Waldstruktur in einem Land- bzw. Stadtkreis auf Grund der Rasterweite von 4 km x 4 km nur mit unbefriedigender statistischer

Genauigkeit. Für weiterführende Untersuchungen sollten detailliertere Walddaten zur Verfügung stehen.

Die Transportkosten sind nach Schüttraummetern berechnet. Da das Gewicht eines Schüttraumeters aber sowohl von der Baumart als auch von der Feuchte der Hackschnitzel abhängt, wäre genauer zu prüfen, ob nicht das Gewicht der Ladung statt des Schüttevolumens zum limitierenden Faktor für die Beladung des LKW werden kann. In diesem Fall müssten die Transportkosten nach Baumarten und Aufarbeitsverfahren differenziert werden. Das Aufarbeitsverfahren erfordert insofern Berücksichtigung, als mit dem Verfahren die Verweilzeit des Hackgutes im Wald und damit die Möglichkeit der natürlichen Trocknung festgelegt ist.

Hackschnitzel werden in der vorliegenden Untersuchung als homogenes Gut gesehen. Angesichts der nach Baumart und Alter unterschiedlichen Rindenanteile, der je nach Verfahrenswahl unterschiedlichen Berücksichtigung der Nadeln, der unterschiedlichen Holzfeuchte und der differenzierten Preise für Hackschnitzel unterschiedlicher Qualität sollten in eine weiterführende Untersuchung Qualitätsaspekte für Hackschnitzel eingehen.

Empirische Daten zu Aufarbeitskosten von Waldrestholz sind nicht verfügbar. Die vorliegende Arbeit baut daher bei Waldrestholz notgedrungen auf pauschalen Annahmen auf. Der hohe Anteil an Waldrestholz am Energieholzpotenzial führt die Notwendigkeit vor Augen, mögliche Verfahren zur Hackschnitzelgewinnung aus Waldrestholz intensiver als bisher zu untersuchen.

Das verwendete Höhenmodell besitzt eine Gitterweite von 200 m x 200 m. Damit können kleinräumige Höhenunterschiede, die einen Harvestereinsatz bereits ausschließen, nicht abgebildet werden. Der Einsatz eines feinmaschigeren Höhenmodells verspricht, den Umfang der Waldflächen, die für einen Hackschnitzelharvester nicht mehr befahrbar sind, genauer bestimmen zu können. Auch die Gebiete, die wegen ihrer Hangneigung ganz aus der Nutzung fallen, können mit einem feineren Höhenmodell exakter abgebildet werden.

Informationen über die Lage von Nationalparks und Biosphärenreservaten sind zwar digital verfügbar und in das Modell integriert. Ebenso ist die Größe der Waldflächen in den Kerngebieten bekannt. Die genaue Lage der Kernzonen ist jedoch nicht im Modell enthalten. Ebenso fehlen Informationen darüber, wie sich die Waldstruktur im Land- bzw. Stadtkreis kleinräumig verteilt. Sowohl für die Kernzonen von Nationalparks und Biosphärenreservaten als auch für die restliche Waldfläche kann daher immer nur die durchschnittliche Baumarten- und Altersstruktur des Kreises unterstellt werden. Eine genauere regionale Abbildung der tatsächlichen Waldstruktur wäre zwar wünschenswert, die zur Zeit zur Verfügung stehenden Hilfsmittel inklusive Satellitenbilder lassen aber nicht auf eine rasche Erfüllung dieses Wunsches hoffen.

Das in dieser Untersuchung ausgewiesene Energieholzpotenzial wird zum Teil bereits zu einem hohen Prozentsatz durch die Holzwerkstoff-, Papier- und mittlerweile auch Sägeindustrie nachgefragt. Die bevorzugte Unterstützung der thermischen Verwertung von Holz durch die im „Erneuerbare-Energien-Gesetz“ geregelten höheren Einspeisevergütungen für Strom aus erneuerbaren Energien weckt bei den Verbänden der Holzindustrie die Sorge, dass zukünftig zu wenig Rohstoff für die stoffliche Verwertung zur Verfügung steht. Eine Abschätzung dieser Auswirkungen des „Erneuerbare-Energien-Gesetz“ wäre nur auf der Basis eines insbesondere im Hinblick auf die regionalen und baumartenspezifischen Konkurrenzbeziehungen verfeinerten Modells möglich.

5 Literaturverzeichnis

- BEHRNDT, W., 1999: Bestandeserschließung – Voraussetzung für ökologisch verträglichen Einsatz von Forsttechnik. Forst und Holz, Hannover, 54, 20, S. 642-646
- BEMMANN, A., GROSSE, W., KÖCHER, R., KUNIS, R., ISSLEIB, M., 1997: Energetische Nutzung von Waldholz in Sachsen. AFZ/Der Wald, Stuttgart, 52, 13, S. 706-710
- BICK, U., DAHM, S., 1992: Bundeswaldinventur 1986-1990. Band I: Inventurbericht und Übersichtstabellen für das Bundesgebiet nach dem Gebietsstand vor dem 3.10.1990 einschließlich Berlin (West). Band II: Grundtabellen für das Bundesgebiet nach dem Gebietsstand vor dem 3.10.1990 einschließlich Berlin (West). Bonn: Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.)
- BUNDESAMT FÜR BAUWESEN UND RAUMORDNUNG (BBR), 1998: Aktuelle Daten zur Entwicklung der Städte, Kreise und Gemeinden, Band 1. Bonn
- DAUBER, E., KREUTZER, K., 1979: Die Ermittlung des Potenzials forstlicher Reststoffe in der Bundesrepublik Deutschland. Forstwissenschaftliches Centralblatt, Berlin, 98, S. 289-297
- DEUTSCHES NATIONALKOMITEE FÜR DAS UNESCO-PROGRAMM „DER MENSCH UND DIE BIOSPHÄRE“ (MAB) [HRSG.], 1996: Kriterien für Anerkennung und Überprüfung von Biosphärenreservaten der UNESCO in Deutschland. Bonn: Bundesamt für Naturschutz
- DROSTE ZU HÜLSHOFF, B. FRH. V., 1969: Struktur und Biomasse eines Fichtenbestandes auf Grund einer Dimensionsanalyse an oberirdischen Baumorganen (Dissertation). München: Ludwig-Maximilians-Universität, Staatswirtschaftliche Fakultät
- ENGLERT, H., SASSE, V., 1994: Zur regionalen Wettbewerbsstellung der forstlichen Produktion. Entwicklung eines Simulationsmodells. Hamburg: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft = Arbeitsbericht des Instituts für Ökonomie der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Nr. 94/1
- FELLER, S., REMLER, N., WEIXLER, H., 1998: Vollmechanisierte Waldhackschnitzel-Bereitstellung – Ergebnisse einer Arbeitsstudie am Hackschnitzel-Harvester. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft = Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Nr. 16
- FELLER, S., WEBENAU, B. V., WEIXLER, H., 1999: Teilmechanisierte Bereitstellung, Lagerung und Logistik von Waldhackschnitzeln. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft = Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Nr. 21
- GEROLD, D., 1986: Zielwälder und Prognosen für Nachhaltseinheiten (Dissertation). Dresden: Technische Universität Dresden

- GROSSE, W., BEMMANN, A., 1999: Energieholzmarkt in den ostdeutschen Bundesländern. AFZ/Der Wald, Stuttgart, 54, 9, S. 478, 480-482
- HASCHKE, P., 1998: Forstliche Energieholzpotenziale in Deutschland und Aspekte ihrer künftigen Nutzung. Teil 1: Modellrechnungen zur Abschätzung des theoretischen und realisierbaren Potenzials an energetisch nutzbarem Waldholz. Holz-Zentralblatt, Stuttgart, 124, 53, S. 801, 806
- KRAMER, H., 1988: Waldwachstumslehre. Hamburg, Berlin: Paul Parey
- KRAMER, H., AKCA, A., 1987: Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur. Frankfurt am Main: Sauerländer's
- KRAMER, H., KRÜGER, H. H., 1981: Vorrat und Nutzungsmöglichkeit forstlicher Biomasse in der Bundesrepublik Deutschland. Der Forst- und Holzwirt, Hannover, 36, S. 33-37
- KREUTZER, K., DAUBER, E., 1980: Die potenzielle forstliche Nutzung in der Bundesrepublik Deutschland. Forstwissenschaftliches Centralblatt, Berlin, 99, S. 1-5
- LOHMANN, U., 1980: Handbuch Holz. Stuttgart: DRW
- MELLINGHOFF, S., BECKER, M., 1998: Distribution des Holzes in Deutschland 1995. Bonn: Forstabsatzfonds, Centrale Marketing-Gesellschaft der deutschen Agrarwirtschaft mbH (Hrsg.)
- NEBE, W., 1979: Zur Auswirkung von Biomassenutzungen in Fichten- und Kiefernbeständen auf den Nähelementekreislauf. Beiträge f. d. Forstwirtschaft, Berlin, 4, S. 152-159
- OHRNER, G., 1999: Wie wirtschaftlich arbeiten Harvester? Forst und Holz, Hannover, 54, 23, S. 727-732
- PELLINEN, P., 1986: Biomasseuntersuchungen im Kalkbuchenwald (Dissertation). Göttingen: Forstwissenschaftlichen Fakultät der Georg-August-Universität
- PLATH, H.-J., KROOP, M., 1996: Gewinnung und Aufarbeitung von Ganzbäumen zu Hackschnitzeln. AFZ/Der Wald, Stuttgart, 51, 17, S. 956-958
- POLLEY, H., SASSE, V., ENGLERT, H., 1996: Entwicklung des potenziellen Rohholzaufkommens bis zum Jahr 2020 für das Gebiet der Bundesrepublik Deutschland. Hamburg: Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft = Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft, Nr. 183
- PRÖLL, W., 2000: GEBIRGSHARVESTER „KOLLER K-501 MIT WOODY 50“. Österreichische Forstzeitung, Wien, 111, 3, S. 1-3

- REMLER, N., FISCHER, M., 1996: Kosten und Leistung bei der Bereitstellung von Waldhackschnitzeln. Freising: Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft = Berichte aus der Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Nr. 11
- SCHLOTT, W., 2000: Schutzgebiete, Waldwirkungen und Forstwirtschaft (Dissertation). München: Forstliche Fakultät der Technischen Universität.
- SCHÖPFER, W., DAUBER, E., 1990: Bestandessortentafeln 82/85. In: Hilfstafeln für die Forsteinrichtung, zusammengestellt für den Gebrauch in der Bayerischen Staatsforstverwaltung. München: Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (Hrsg.)
- SCHWANITZ, P., 1994: Hackschnitzelgewinnung in Dänemark. Forsttechnische Information (FTI), Mainz, 52, 10, S. 114-115
- STAMPFER, K., STEINMÜLLER, T., 2000: Raupenharvester in der Durchforstung. Österreichische Forstzeitung, Wien, 111, 3, S. 4-6

6 Anhang

Abb. A 1: Energieholzpotenzial in der Verteilung auf Schwachholz und Waldrestholz nach Bundesländern (untere Aufarbeitungsgrenze 8 cm); in t_{atro}

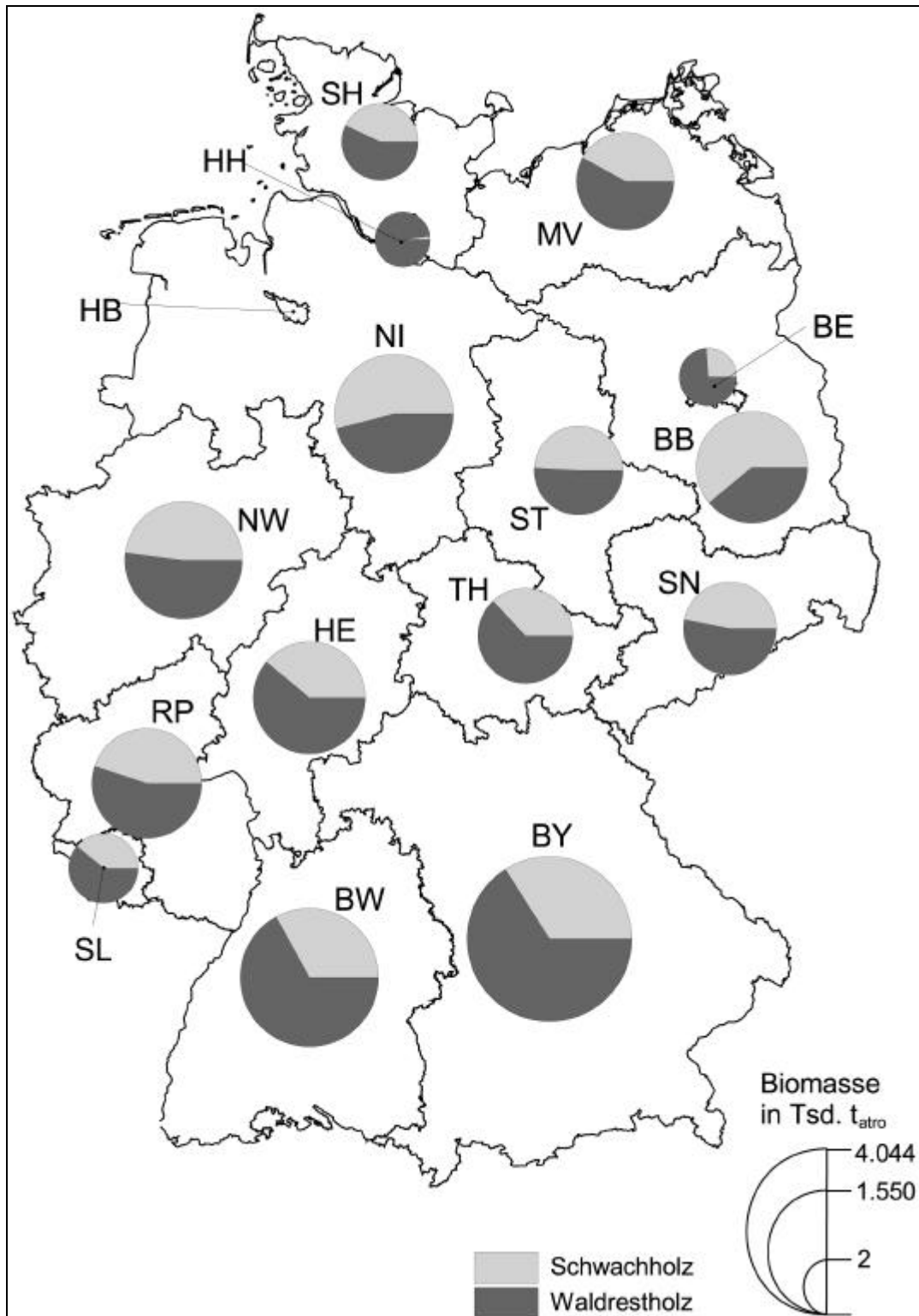


Abb. A 2: Energieholzaufkommen aus Schwachholz (untere Aufarbeitungsgrenze 8 cm) nach Baumartengruppen in Abhängigkeit vom Preis für Hackschnitzel; in Tsd. t_{atro}

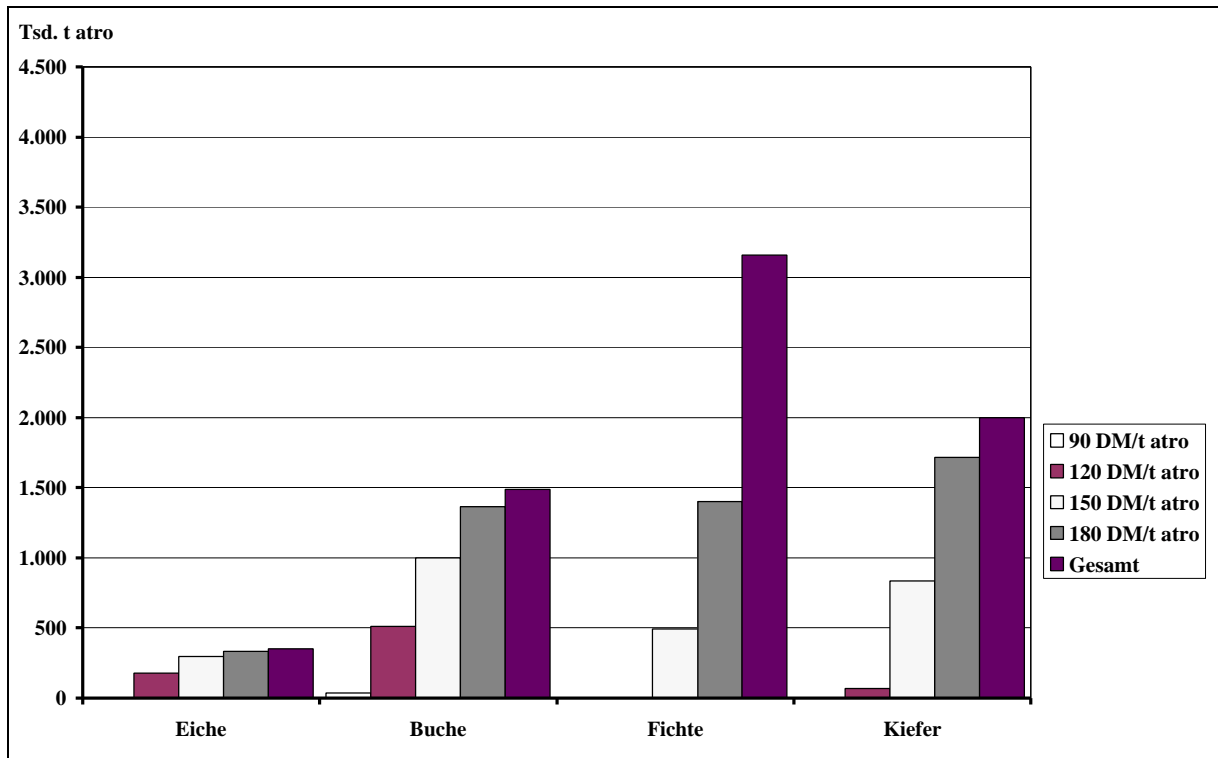


Abb. A 3: Energieholzaufkommen aus Schwachholz (untere Aufarbeitungsgrenze 12 cm) nach Baumartengruppen in Abhängigkeit vom Preis für Hackschnitzel; in Tsd. t_{atro}

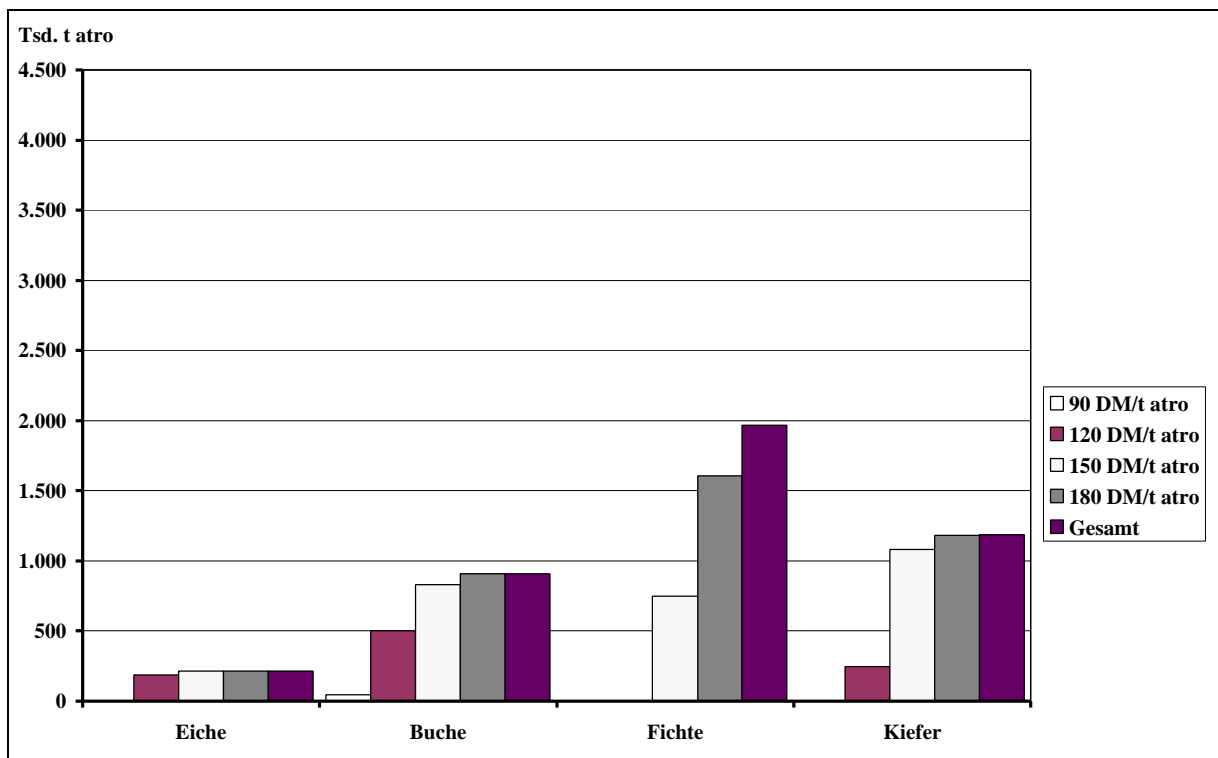


Abb. A 4: Energieholzaufkommen aus Waldrestholz nach Baumartengruppen in Abhängigkeit vom Preis für Hackschnitzel; in Tsd. t_{atro}

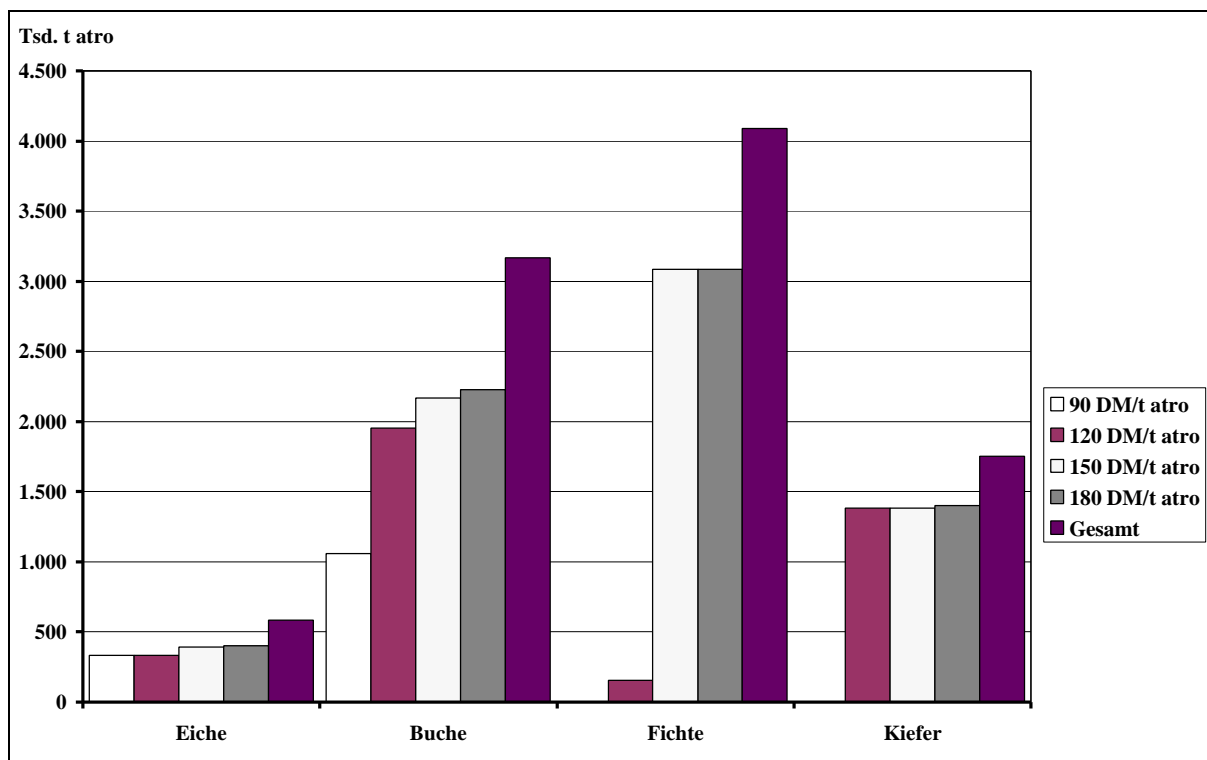


Abb. A 5 Energieholzaufkommen bei einem Hackschnitzelpreis von 120 DM/t_{atro} nach Raumordnungsregionen (untere Aufarbeitungsgrenze 8 cm); in t_{atro}

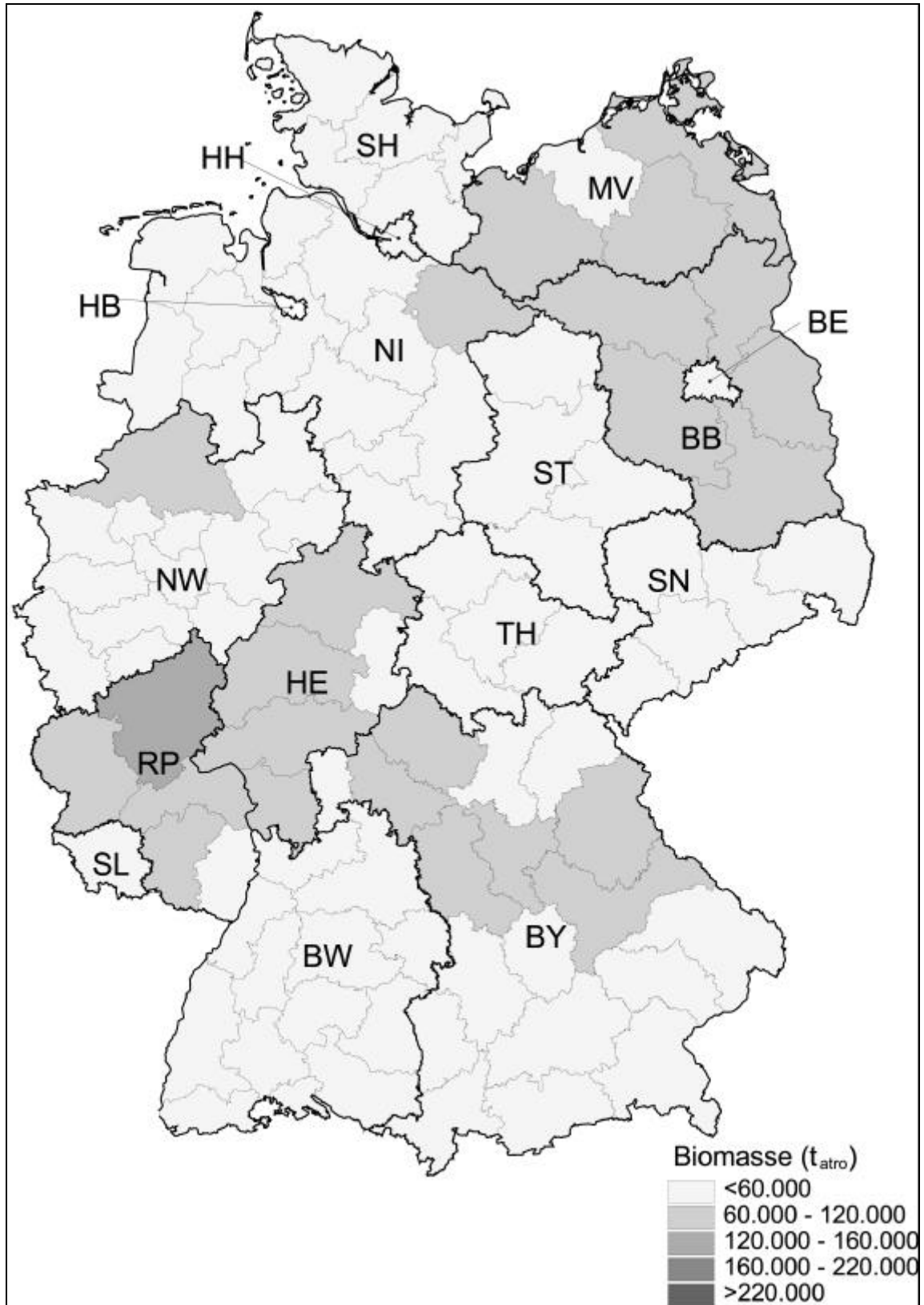
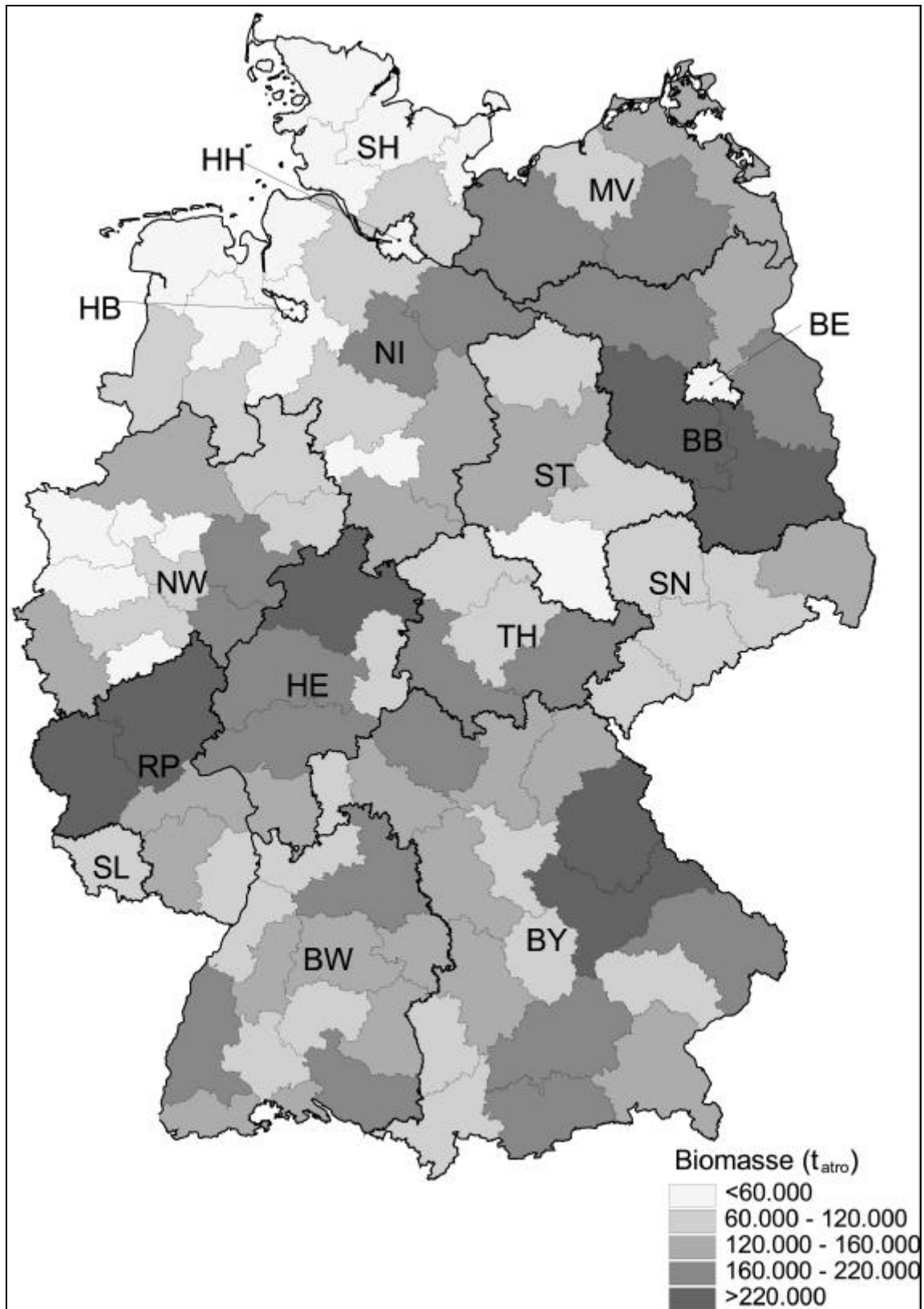


Abb. A 6: Energieholzaufkommen bei einem Hackschnitzelpreis von 180 DM/t_{atro} nach Raumordnungsregionen (untere Aufarbeitungsgrenze 8 cm); in t_{atro}



Tab. A1 Raumordnungsregionen; Energieholzpotenzial [t_{atro}] und zur Mobilisierung von 80 % des Potenzials an Energieholz aus Schwachholz zu zahlende Preise [DM/t_{atro}]; untere Aufarbeitungsgrenze jeweils 8 cm

Lfd. Nr.	Name	Potenzial	Preis
1	Schleswig-Holstein Nord	37.420	170
2	Schleswig-Holstein Süd-West	21.962	189
3	Schleswig-Holstein Mitte	56.356	228
4	Schleswig-Holstein Ost	24.676	264
5	Schleswig-Holstein Süd	112.118	163
6	Hamburg	1.968	136
7	Westmecklenburg	252.711	196
8	Mittleres Mecklenburg/Rostock	112.845	211
9	Vorpommern	194.483	199
10	Mecklenburgische Seenplatte	233.463	201
12	Ost-Friesland	17.730	217
13	Bremerhaven	31.585	178
14	Hamburg-Umland-Süd	116.624	187
15	Bremen-Umland	66.484	171
16	Oldenburg	68.323	233
17	Emsland	115.615	198
18	Osnabrück	96.365	189
19	Hannover	134.409	204
20	Südheide	244.533	177
21	Lüneburg	200.556	184
22	Braunschweig	171.640	168
23	Hildesheim	86.615	223
24	Göttingen	237.006	223
25	Prignitz-Oberhavel	284.024	201
26	Uckemark-Barnim	202.655	198
27	Oderland-Spree	213.475	168
28	Lausitz-Spreewald	313.354	172
29	Havelland-Fläming	267.720	173
30	Berlin	12.321	167
31	Altmark	143.652	219
32	Magdeburg	207.342	217
33	Dessau	108.072	163
34	Halle/S.	80.653	201
35	Münster	144.959	163
36	Bielefeld	104.748	174
37	Paderborn	122.151	197
38	Arnsberg	267.782	235
39	Dortmund	10.411	203
40	Emscher-Lippe	36.968	164
41	Duisburg/Essen	63.181	174
42	Düsseldorf	66.027	153
43	Bochum/Hagen	149.494	201
44	Köln	125.427	196
45	Aachen	167.416	187
46	Bonn	49.637	169
47	Siegen	220.639	213

48	Nordhessen	357.275	218
49	Mittelhessen	341.532	235
50	Osthessen	126.780	177
51	Rhein-Main	294.128	187
52	Starkenburger	195.076	166
53	Nordthüringen	127.183	196
54	Mittelthüringen	116.602	216
55	Südthüringen	244.003	229
56	Ostthüringen	228.007	217
57	Westsachsen	94.044	161
58	Oberes Elbtal/Osterzgebirge	118.967	220
59	Oberlausitz-Niederschlesien	161.843	182
60	Chemnitz-Erzgebirge	134.216	230
61	Südwestsachsen	142.068	232
62	Mittelrhein-Westerwald	394.863	202
63	Trier	358.445	188
64	Rheinhausen-Nahe	144.119	149
65	Westpfalz	212.719	180
66	Rheinpfalz	114.247	173
67	Saar	131.663	202
68	Unterer Neckar	150.932	203
69	Franken	246.941	184
70	Mittlerer Oberrhein	157.371	211
71	Nordschwarzwald	188.259	206
72	Stuttgart	195.175	205
73	Ostwürttemberg	183.432	189
74	Donau-Iller (BW)	198.039	181
75	Neckar-Alb	183.125	199
76	Schwarzwald-Baar-Heuberg	209.784	200
77	Südlicher Oberrhein	313.142	221
78	Hochheim-Bodensee	215.996	199
79	Bodensee-Oberschwaben	267.637	199
80	Bayrischer Untermain	134.967	191
81	Würzburg	165.215	168
82	Main-Rhön	259.273	179
83	Oberfranken-West	186.281	198
84	Oberfranken-Ost	186.480	213
85	Oberfranken-Nord	378.615	205
86	Industrieregion Mittelfranken	143.340	181
87	Westmittelfranken	221.463	205
88	Augsburg	224.659	202
89	Ingolstadt	173.354	216
90	Regensburg	348.214	164
91	Donau-Wald	315.052	202
92	Landshut	154.162	242
93	München	260.349	211
94	Donau-Iller (BY)	154.782	198
95	Allgäu	159.886	221
96	Oberland	344.266	230
97	Südostoberbayern	233.593	192