

Analyse der energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor im Kontext der Förderung von erneuerbaren Energieträgern

Dissertation zur Erlangung des Doktorgrades

an der Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften

Fachbereich Biologie

der Universität Hamburg

vorgelegt von

Sebastian Glasenapp

geboren in Valencia, Spanien

Hamburg, 2019

1. Gutachter: Professor Dr. Udo Mantau
2. Gutachter: Professor Dr. Peter Schwarzbauer

Disputation vom 08.06.2020

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Professor Dr. Andreas Krause

Mitglied der Prüfungskommission:

Professor Dr. Udo Mantau

Mitglied der Prüfungskommission:

Professor Dr. Bodo Saake

Danksagung

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Udo Mantau für seine hervorragende fachliche Unterstützung, die konstruktive Kritik und hilfreichen Anregungen, die zur Erstellung dieser Dissertation führten.

Ebenfalls danken möchte ich Herrn Professor Dr. Peter Schwarzbauer für seine Bereitschaft als Zweitgutachter meine Dissertation zu bewerten.

Herrn Professor Dr. Andreas Krause danke ich für das Einverständnis die Prüfungskommission zu leiten und Herrn Professor Dr. Bodo Saake für die Bereitschaft an der Prüfungskommission teilzunehmen.

Dank gebührt außerdem Professor Dr. Francisco Aguilar, Przemko Döring, Dr. Holger Weimar und den Mitarbeitern des Thünen-Instituts für die tolle Zusammenarbeit sowie den wissenschaftlichen und freundschaftlichen Austausch.

Zuletzt gilt ein besonderer Dank meiner Familie – meinen Eltern Claudia Glasenapp und Dr. Friedrich Glasenapp, meinen Geschwistern, Dr. Franziska Glasenapp und Christian Glasenapp, sowie in besonderem Maße meiner Verlobten, Olga Demant, und meinem Sohn, Julian Glasenapp. Ohne ihre Unterstützung wäre diese Arbeit nicht möglich gewesen.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Energetische Holzverwendung im Haushaltssektor: Holzsortimente und relevante Maßeinheiten	3
2.1	Methode	4
2.2	Ergebnisse	8
2.3	Diskussion	11
3	Statistiken zur energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor in Deutschland..	13
3.1	Amtliche Energiestatistik.....	13
3.1.1	Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik	13
3.1.2	Arbeitsgruppe Energiebilanzen	14
3.2	Rohstoffmonitoring Holz-Zeitreihe.....	16
3.2.1	Methodisches Vorgehen	16
3.2.2	Ergebnisse	17
3.3	RWI/Forsa-Zeitreihe	19
3.3.1	Methodisches Vorgehen	20
3.3.2	Ergebnisse	21
3.4	Rheinbraun Brennstoff-Zeitreihe	22
3.4.1	Methodisches Vorgehen	22
3.4.2	Ergebnisse	23
3.5	Diskussion	23
3.5.1	Methodisches Vorgehen	24
3.5.2	Ergebnisse	26
4	Bedeutung von Holzenergie für den Holzmarkt und Energiesektor	32
4.1	Bedeutung in der Forst- und Holzwirtschaft	32
4.2	Bedeutung im Energiesektor.....	36
4.3	Diskussion	40
5	Ökonometrische Analyse der Einflüsse auf den energetischen Holzeinsatz im deutschen Haushaltssektor.....	41
5.1	Methode	41
5.2	Datensatz	44
5.2.1	Datenerfassung und -aufbereitung.....	45
5.2.2	Deskriptive Statistik für die Jahre 2005, 2010 und 2014	46
5.2.3	Charakterisierung der Brennholznutzer für das Jahr 2014	47
5.3	Theoretisches Modell.....	50
5.4	Ergebnisse	53

5.5	Diskussion	60
6	Statistiken zur energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor der EU28-Mitgliedsländer.....	64
6.1	IEA/Eurostat/UNECE: Fragebogen zu erneuerbaren Energien und Abfällen.....	65
6.2	IRENA: Fragebogen zur Erneuerbare Energien Statistik.....	67
6.3	UNSD: Energiestatistik	68
6.4	FAO/UNECE/ITTO/Eurostat: Joint Forest Sector Questionnaire	70
6.5	UNECE/FAO: Joint Wood Energy Enquiry	70
6.6	Europäische Kommission: Fortschrittsberichte für erneuerbare Energien	74
6.7	Vergleich der Statistiken	75
6.8	Diskussion	78
7	Zusammenfassung	79
	Literaturverzeichnis.....	I
	Anhang A: Tabellen und Abbildungen.....	XIV
	Anhang B: Manuskript.....	XIV
	Anhang C: Erklärungen zum Eigenanteil der Veröffentlichungen	XV

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Auswirkungen von Änderungen in der Holzartenzusammensetzung und Holzfeuchte auf den Heizwert in Deutschland	10
Abbildung 2: AGEE-Stat-Zeitreihe zum energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor	14
Abbildung 3: Vergleich der AGEB- und AGEE-Stat-Zeitreihen zum energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor	15
Abbildung 4: Ergebnisse des Rohstoffmonitoring Holz zum energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor und die zeitliche Entwicklung von erklärenden Variablen	18
Abbildung 5: Energetischer Holzeinsatz im Haushaltssektor von RWI/Forsa	21
Abbildung 6: Energetische Holzeinsatz im Haushaltssektor nach Rheinbraun Brennstoff GmbH	23
Abbildung 7: Energetischer Holzeinsatz im deutschen Haushaltssektor	27
Abbildung 8: Energetische Holzverwendung im Haushaltssektor und Unsicherheiten in der Umrechnung	28
Abbildung 9: Stoffliche und energetische Holzverwendung in Mio. m ³	33
Abbildung 10: Holzeinsatz nach den Sektoren der Holzwirtschaft im Jahr 2016	34
Abbildung 11: Sortimentsverteilung nach Verwendungssektoren im Jahr 2015 bzw. 2016	35
Abbildung 12: Organigramm des Energiesektors	37
Abbildung 13: Endenergieverbrauch in Deutschland	38
Abbildung 14: Endenergieverbrauch im deutschen Haushaltssektor	39
Abbildung 15: Verteilung der Brennholznutzer und des Wohnungsbestands nach Wohnungseigenschaften	48
Abbildung 16: Verteilung der Brennholznutzer und des Wohnungsbestands nach sozioökonomischen Eigenschaften	50
Abbildung 17: Punkt elastizitäten für alternative Energiepreise und Gradtagzahlen	59
Abbildung 18: Internationale Berichterstattungen mit Bezug zur energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor	65
Abbildung 19: Absoluter Einsatz fester Biomasse (ohne Holzkohle) im Haushaltssektor der EU28-Mitgliedsländer im Jahr 2015	66
Abbildung 20: Vergleich der Daten aus IRENA, UNSD und IEA/Eurostat/UNECE, jeweils zum Jahr 2015	76
Abbildung 21: Vergleich der Daten aus UNECE/FAO und IEA/Eurostat/UNECE für die Jahre 2007, 2009, 2011, 2013 und 2015	77
Abbildung 22: Der energetische Holzeinsatz nach Holzsortimenten in den Haushaltssektoren der EU28-Mitgliedsländern im Jahr 2015	78

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten	3
Tabelle 2:	Eigenschaften von Nadel und Laubholz in Deutschland und der EU28	5
Tabelle 3:	Holzartenverteilung und Holzfeuchtegehalt nach Holzsortimenten, die für die energetische Holzverwendung im Haushaltssektor relevant sind	6
Tabelle 4:	Heizwerte nach Holzsortimenten in Deutschland und der EU28.....	9
Tabelle 5:	Energetisch verwendete Holzsortimente im Haushaltssektor aus dem Rohstoffmonitoring Holz.....	19
Tabelle 6:	Energetische Verwendung von Holzsortimenten im Haushaltssektor von RWI/Forsa	22
Tabelle 7:	Methodisches Vorgehen in den empirischen Studien	24
Tabelle 8:	Verteilung der energetisch verwendeten Holzsortimente aus den Ergebnissen des Rohstoffmonitoring Holz in PJ.....	29
Tabelle 9:	Verteilung der energetisch verwendeten Holzsortimente aus den Ergebnissen von RWI/Forsa in PJ.....	30
Tabelle 10:	Theoretische und genutzte Potenziale von Holz aus primären Quellen in Mio. m ³ im Jahr 2016.....	36
Tabelle 11:	Im Tobit-Modell berücksichtigte Variablen.....	43
Tabelle 12:	Regressionskoeffizienten, Standardfehler und p-Werte des linkszensierten Tobit-Modells	54
Tabelle 13:	Marginale Effekte zu den jährlichen Mittelwerten der Jahre 2005, 2010 und 2014.....	56
Tabelle 14:	Punktelastizitäten ausgewählter Variablen	57
Tabelle 15:	Einsatz fester Biomasse (ohne Holzkohle) in TJ in den Haushaltssektoren der EU28-Mitgliedsländer im Jahr 2015	67
Tabelle 16:	Verwendung von Brennholz in den Haushaltssektoren der EU28-Mitgliedsländer in Mio. m ³ im Jahr 2015.....	69
Tabelle 17:	Energetische Holzverwendung (ohne Holzkohle) in den Haushaltssektoren der EU28-Mitgliedsländer und nach Holzsortimenten	73
Tabelle 18:	Nationale Gesamtziele zum Ausbau der erneuerbaren Energien nach EU-Richtlinie 2009/28/EG für die EU28.....	74

Während der Dissertation angefertigte Publikationen

Wissenschaftliche Beiträge

1. **Glasenapp S, Aguilar F X, Weimar H, Mantau U** (2019) Assessment of residential wood energy consumption using German household-level data. *Biomass Bioenergy* 126:117-129, doi: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.04.020>.
2. **Mantau U, Mayr ML, Döring P, Saal U, Glasenapp S, Blanke C** (2017) World markets for wood: status and prospects. In: Meyers RA (ed) *Encyclopedia of sustainability science and technology*. New York: Springer, pp 1-27, doi: https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_990-1.
3. **Glasenapp S, Aguilar F X, Döring P, Fonseca M, Weimar W**,¹ Conversion factors for residential wood energy consumption prelude harmonization of forest products and energy statistics. (Manuskript).

Beiträge in Zeitschriften

1. **Glasenapp S, Aguilar F X, Mantau U, Weimar H** (2019) Energetische Holzverwendung in Haushalten, Verbrauchsmusteranalyse gibt Einblicke in das Nutzungsverhalten der Privathaushalte in Deutschland. *Holz Zentralblatt* 38:814-815.
2. **Mantau U, Döring P, Weimar H, Glasenapp S** (2018) Utilization of wood resources in biomass heat and power plants in the context of market developments. In: *Proceedings / 26th European Biomass Conference and Exhibition, 14 - 17 May 2018, Copenhagen, Denmark*.
3. **Glasenapp S, McCusker A** (2018) Wood energy data: the joint wood energy enquiry. In: Aguilar, F X (ed) *Wood energy in the ECE region, Data, trends and outlook in Europe, the Commonwealth of Independent States and North America*. Geneva: UNECE, pp 12-29.
4. **Seintsch B, Döring P, Dunger K, Gerber K, Glasenapp S, Klatt S, Linde A, Mantau U, Meier-Landsberg E, Oehmichen K, Reise J, Rüter S, Saal U, Schweinle J, Schier F, Selzer AM, Rosenkranz L, Wenz E, Weimar H, Winter S** (2017) Das WEHAM-Szenarien-Verbundforschungsprojekt. *AFZ Wald* 13:10-13.
5. **Mantau U, Döring P, Glasenapp S, Blanke C** (2017) Szenarien der stofflichen und energetischen Holzverwendung. *AFZ Wald* 13:18-20.
6. **Rosenkranz L, Selzer AM, Seintsch B, Dunger K, Döring P, Gerber K, Glasenapp S, Klatt S, Kukulka F, Meier-Landsberg E, Linde A, Mantau U, Oehmichen K, Reise J, Röhling S, Saal U, Schier F, Schweinle J, Weimar H, Winter S** (2017) Verbundforschungsbericht WEHAM-Szenarien, Stakeholderbeteiligung bei der Entwicklung und Bewertung von Waldbehandlungs- und Holzverwendungsszenarien. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 129 p, Thünen Working Paper 73, doi: <https://doi.org/10.3220/WP1499246183000>.
7. **Rosenkranz L, Diederichs SK, Döring P, Dunger K, Gerber K, Glasenapp S, Klatt S, Kukulka F, Mantau U, Meier E, Oehmichen K, Reise J, Rock J, Rüter S, Saal U, Schweinle J, Schier F, Weimar H, Winter S, Seintsch B** (2015) Waldbehandlung und Holzverwendung in der Zukunft. *AFZ Wald* 23:45-47.

¹ Anhang B

Projektberichte

1. **Glasenapp S, Weimar H** (2019) GHD-Festbiomasse im Wärmesektor. Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie.
2. **Döring P, Glasenapp S, Weimar H, Mantau U** (2018a) Die energetische Nutzung von Holz in Biomassefeuerungsanlagen unter 1 MW in Nichthaushalten im Jahr 2016. Teilbericht. Universität Hamburg, Informationssysteme für Rohstoffe (Rohstoffmonitoring Holz).
3. **Döring P, Glasenapp S, Mantau U** (2017a) Holz- und Zellstoffindustrie 2015, Entwicklung der Produktionskapazität und Holzrohstoffnutzung. Zwischenbericht. Universität Hamburg, Informationssysteme für Rohstoffe (Rohstoffmonitoring Holz).
4. **Döring P, Glasenapp S, Mantau U** (2017b) Holzwerkstoffindustrie 2015, Entwicklung der Produktionskapazität und Holzrohstoffnutzung. Abschlussbericht (Rohstoffmonitoring Holz).
5. **Döring P, Glasenapp S, Mantau U** (2017c) Sägeindustrie 2015, Einschnitt- und Produktionsvolumen, Zwischenbericht. Universität Hamburg, Informationssysteme für Rohstoffe (Rohstoffmonitoring Holz).
6. **Döring P, Glasenapp S, Mantau U** (2016) Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2014, Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Universität Hamburg, Informationssysteme für Rohstoffe. Hamburg (Rohstoffmonitoring Holz).

1 Einleitung

Holz ist ein wichtiger Energieträger der erneuerbaren Energien. Die regionale Verfügbarkeit, einfache Lagerung sowie Verbrennungseigenschaften sind wesentliche Vorteile des Brennstoffs, die die energetische Verwendung attraktiv machen. Außerdem bindet Holz während der Wachstumsphase Kohlenstoffdioxid aus der Atmosphäre und gibt bei der Verbrennung lediglich den zuvor gebundenen Kohlenstoff frei. Dies macht Holz zu einem klimaneutralen Energieträger (Asikainen und Aguilar 2018).

In Europa wird die Verwendung von erneuerbaren Energien auf Grundlage der EU Richtlinie 2009/28/EC gefördert. In diesem Zusammenhang erstellten Mitgliedsstaaten der Europäischen Union Nationale Aktionspläne für erneuerbare Energien in denen Strategien zum Ausbau der Nutzung beschrieben sind. Das Ziel der Europäischen Kommission ist es, bis ins Jahr 2020 20 % des gesamten Energiebedarfs durch erneuerbare Energien zu decken (EU 2009, Scarlat et al. 2015). Anschließend soll der Anteil an erneuerbaren Energieträgern bis ins Jahr 2030 auf 32 % gesteigert werden. Mit dem weiteren Ausbau der erneuerbaren Energien soll der Ausstoß klimaschädlicher Emissionen und die Importabhängigkeit im Energiesektor, durch die Verwendung regional verfügbarer Rohstoffe, verringert werden. Außerdem soll der Ausbau zur wirtschaftlichen Entwicklung ländlicher Regionen beitragen (EU 2018).

Die europäischen Zielvorgaben beeinflussen die Entwicklung des deutschen Energiesektors. Im Zuge der Erstellung des Nationalen Aktionsplans nach EU Richtlinie 2009/28/EC legte Deutschland Strategien zur Erreichung der Ausbauziele für erneuerbare Energien vor. Das nationale Ziel besteht darin, den Anteil an erneuerbaren Energien im Bruttoendenergieverbrauch von 6 % im Jahr 2005 auf 18 % im Jahr 2020 zu erhöhen (EU 2009). Für den deutschen Beitrag zur Erreichung der europäischen Ziele bis ins Jahr 2030 erarbeitet die Bundesregierung derzeit einen Nationalen Energie- und Klimaplan in dem aktualisierte Ausbaupfade festgelegt werden. Für den Wärme- und Kältesektor ist eine Steigerung des Anteils an erneuerbaren Energien am Endenergieverbrauch von 15 % im Jahr 2021 auf 27 % im Jahr 2030 geplant (BMW i 2019, EU 2018). Derzeit ist Holzenergie einer der wichtigsten erneuerbare Energieträger des Wärme- und Kältesektors (BMW i 2018a, BMW i 2019). Sollte die Nachfrage nach Brennholz aufgrund politischer Zielvorgaben steigen, könnte dies negative Auswirkungen auf die nachhaltige Waldbewirtschaftung haben. Trotz der nachwachsenden Eigenschaften ist Holz nicht unbegrenzt verfügbar, denn eine Übernutzung der Ressourcen kann z. B. zur Entwaldung oder Verarmung der Biodiversität führen (Anttila 2018).

Im Folgenden wird die energetische Holzverwendung in Haushalten untersucht. Es wird auf die Datenverfügbarkeit, Bedeutung und Steuerungsmöglichkeiten der energetischen Holzverwendung in Haushalten eingegangen. Haushalte sind in diesem Zusammenhang als einzelne Personen oder Personengemeinschaften definiert, die eine wirtschaftliche Einheit bilden und in einer Wohnung leben (Destatis 2019).

Informationen zur energetischen Holzverwendung werden in Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft sowie des Energiesektors erfasst. Traditionell verwenden die Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft Volumen- und Gewichtseinheiten, um Stoffströme zu quantifizieren. Statistiken des Energiesektors bemessen Energiemengen in Energieeinheiten.

Aufgrund der unterschiedlichen Einheiten war es bisher schwierig die Angaben beider Statistiken zu vergleichen. In Kapitel 2 werden die, im Haushaltssektor verwendeten, Holzsortimente aufgeführt und eine Methode zur Umrechnung von Angaben aus Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft in Energieeinheiten vorgestellt. In diesem Zusammenhang wird außerdem auf Faktoren eingegangen, die die Berechnung der Umrechnungsfaktoren beeinflussen.

Kapitel 3 befasst sich mit Statistiken, die Angaben zum energetischen Holzeinsatz im deutschen Haushaltssektor machen. Es wird auf die Verbindung zwischen der amtlichen Statistik und den empirischen Studien eingegangen sowie Methoden zur Datenerfassung diskutiert. In Kapitel 4 wird die Bedeutung der energetischen Holzverwendung für den Holzmarkt und den Energiesektor untersucht. Kapitel 5 beinhaltet eine ökonometrische Analyse der Einflüsse auf die energetische Holzverwendung in Haushalten, die Erkenntnisse über die Gründe für Variationen in der Holznutzung liefert.

Kapitel 6 befasst sich mit der Datenlage in der Europäischen Union (EU28²). Es wird auf die unterschiedlichen Berichtssysteme der Forst- und Holzwirtschaft sowie der Energiestatistik eingegangen, die den energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor erfassen. Im Anschluss und mit Hilfe der in Kapitel 2 berechneten Umrechnungsfaktoren werden die Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft sowie des Energiesektors verglichen und Möglichkeiten der Verschneidung der Datensätze diskutiert.

² EU28 umfasst folgende Mitgliedsländer: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechien, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern

2 Energetische Holzverwendung im Haushaltssektor: Holzsortimente und relevante Maßeinheiten

Informationen zur energetischen Holzverwendung in Haushalten werden sowohl von Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft als auch des Energiesektors bereitgestellt. Der Detailgrad der Daten variiert je nach Anforderungen der Statistiken. Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft erfassen die verwendeten Holzsortimente sehr differenziert. Je nach Herkunft können Holzsortimente unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Im Folgenden wird zwischen Holz aus primären, sekundären und tertiären Quellen unterschieden. Holz aus primären Quellen stammt direkt aus dem Wald oder von verholzten Pflanzen aus anderen Flächen. Holz aus Sekundärquellen umfasst Nebenprodukte aus der Holzverarbeitenden Industrie und Energieholzprodukte (Glaserapp und McCusker 2018). Gebrauchtholz ist als Holz aus tertiären Quellen definiert und umfasst Holzprodukte, wie z. B. Massivholz und Holzwerkstoffe, von denen sich der Besitzer entledigt hat, entledigen will oder muss (BMJV 2017a, BMJV 2017b). In der Statistik der Forst- und Holzwirtschaft werden Holz mengen in Volumen- oder Gewichtseinheiten gemessen, um die Vergleichbarkeit zu anderen Holzsortimenten (z. B. Schnittholz, Hackschnitzel) herzustellen. Für die Mitgliedsländer der EU28 sind Faktoren zur Umrechnung von Volumen- in Gewichtseinheiten bekannt (UNECE/FAO 2010).

In der Energiestatistik ist der Detailgrad an erfassten Holzsortimenten häufig sehr begrenzt. Beispielsweise wird die energetische Holzverwendung stark aggregiert oder zusammen mit nicht-verholzter Biomasse ausgewiesen (vgl. Kapitel 3 und 6). Demgegenüber werden Verwendungssektoren sehr differenziert dargestellt. Um die Vergleichbarkeit zu anderen Energieträgern herzustellen, werden alle Energieträger des Energiesektors in Energieeinheiten des Heizwerts angegeben (UNSD 2018). In der Regel erfolgt der Vergleich von Energieträgern in der Einheit Terajoule (TJ). Allerdings werden auch andere Einheiten, wie z. B. Kilowattstunden oder Tonnen Rohöläquivalente, verwendet und über standardisierte Faktoren umgerechnet. In Tabelle 1 sind die Umrechnungsfaktoren der relevanten Energieeinheiten aufgeführt (Ströbele et al. 2012).

Tabelle 1: Umrechnungsfaktoren für Energieeinheiten

Ausgangseinheit	Umrechnungsfaktor	Einheit
Kalorie (cal)	4,19	TJ/Tcal
Wattstunde (Wh)	3.600,00	TJ/TWh
Rohöleinheiten (ROE)	41,87	TJ/k t ROE

Quelle: Ströbele et al. 2012

Eine Verschneidung der beiden Statistiken kann die Datenverfügbarkeit und Aussagekraft verbessern. Beispielsweise können mit differenzierten Informationen aus Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft Aussagen über die Nachhaltigkeit der Holznutzung getroffen werden (vgl. Kapitel 4 und 6). Diese Informationen werden auch für Berichterstattungen der Energiestatistik benötigt, können mit der derzeitigen Struktur der Energieträger allerdings nur schwer abgebildet werden (vgl. Kapitel 6.5, EU 2009, EU 2018). Eine Angleichung der Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft an die Energiestatistik kann diese Informationslücke schließen. Der Gebrauch von unterschiedlichen Einheiten stellt allerdings eine Herausforderung für die Verschneidung beider Statistiken dar.

Obwohl bereits Faktoren für die Umrechnung von Volumen- oder Gewichtseinheiten in Energieeinheiten veröffentlicht wurden, ist deren Verwendung im Anwendungsfall oft schwierig, da die Faktoren nicht mit der Sortimentsstruktur der Statistiken übereinstimmen. Außerdem müssen häufig individuelle Annahmen zu Sortimentseigenschaften getroffen werden, um Umrechnungsfaktoren zu berechnen (Hagauer et al. 2008, Hartmann 2009, UNECE/FAO 2010, Krajnc 2015, UNSD 2018). Whiteman (2017) stellte außerdem ein mangelndes Verständnis über die Berechnung und potenzielle Größenordnungen von Umrechnungsfaktoren bei nationalen Korrespondenten der Energiestatistik fest.

Um die Vergleichbarkeit der Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft sowie des Energiesektors herzustellen, wird in Kapitel 2.1 ein Berechnungsverfahren für Umrechnungsfaktoren vorgestellt. Im Anschluss werden die Ergebnisse in Kapitel 2.2 dargestellt und in Kapitel 2.3 diskutiert. Die Berechnungen basieren auf einer Vorarbeit, die als Manuskript in Anhang B beigefügt ist.

2.1 Methode

Bei der Umrechnung von Volumen- oder Gewichtseinheiten in Energieeinheiten müssen die spezifischen Eigenschaften von Holzsortimenten berücksichtigt werden. Hierzu zählen die Holzdichte, Holzfeuchte, Volumenquellung und der Heizwert (Hartmann 2009).

Die Holzdichte ist als Verhältnis von Masse und Volumen definiert. Je nach Holzfeuchte wird zwischen der Darrdichte (ρ_0) und Rohdichte (ρ_u) unterschieden. Die Darrdichte beschreibt das Verhältnis von Masse und Volumen im darrtrockenen bzw. absolut trockenem Zustand (atro) von Holz. Die Rohdichte ist das Verhältnis von Masse und Volumen bei einer gegebenen Holzfeuchte. Die Holzfeuchte (u) steht für das Verhältnis zwischen dem Gewicht des Wassers, das im Holz enthalten ist und dem Trockengewicht der Holzprobe. Damit unterscheidet sich die Holzfeuchte vom Wassergehalt, der die Relation von Wassermasse zur feuchten Holzprobe darstellt. Bei den meisten Holzarten schwindet das Holzvolumen, wenn die Holzfeuchte unter einen Wert von $u < 30\%$ sinkt. Holz, das bereits geschwunden ist, kann wieder aufquellen, wenn es Feuchtigkeit aufnimmt. Das differenzielle Quellmaß (β_v) steht dabei für die durchschnittliche Zunahme an Volumen bei zunehmender Holzfeuchte (Kollmann 1951, Niemz und Sonderegger 2017).

Der Heizwert ($HG_{i,(u)}$) bezieht sich auf die nutzbare Energiemenge, die beim Verbrennen von Holz freigesetzt wird. Wird Holz verbrannt, verdunstet das Wasser, das im Zellinneren des Holzes vorhanden ist, als Wasserdampf. Außerdem entsteht bei der Reaktion von molekularem Wasserstoff und Sauerstoff aus der Atmosphäre Wasserdampf. Die Bildung von Wasserdampf benötigt Energie und verringert den Heizwert. Die Berücksichtigung von Energieverlusten durch die Bildung von Wasserdampf unterscheidet den Heizwert vom Brennwert, der die gesamte Energiemenge im Holz erfasst (Kollmann 1951, Hartmann 2009).

Die Holzeigenschaften Darrdichte (ρ_0), differenzielles Quellmaß (β_v) und Heizwert bei darrtrockenem Zustand ($HG_{i,(u=0)}$) unterscheiden sich je nach Holzart (Kollmann 1951, Sell 1997, Lohmann 1998, Wagenführ 2004, Wagenführ 2007, Niemz und Sonderegger 2017). Tabelle 2 zeigt die Eigenschaften von Nadelholz (NH) und Laubholz (LH) in Deutschland und der Europäischen Union (EU28). Die dargestellten Eigenschaften für

Nadel- und Laubholz sind gewichtete Durchschnittswerte der relevanten Holzarten des jeweiligen Landes oder Region. Die Gewichtung erfolgte nach der Holzartenzusammensetzung des Holzvorrats. Detaillierte Informationen zu den Holzeigenschaften und die Holzartenzusammensetzung des Holzvorrats in den Mitgliedsländern der EU28 sind in Anhang A.I und A.II dargestellt (Zimmermann 1982, Sell 1997, Lohmann 1998, Wagenführ 2004, Wagenführ 2007, Hartmann 2009, FAO 2015, TFZ 2019).

Tabelle 2: Eigenschaften von Nadel und Laubholz in Deutschland und der EU28

Eigenschaft	Einheit	Statistik	Deutschland		EU28	
			NH	LH	NH	LH
Darrdichte, ρ_0	kg atro/m ³ atro	Min	306	454	304	449
		Standard	453	678	457	651
		Max	729	898	752	843
Heizwert, $HG_{i,(u=0)}$	MJ/kg atro	Standard	18,9	17,9	18,9	17,9
		Min	0,380	0,389	0,378	0,395
Differenzielles Quellmaß, β_v	%/%u	Standard	0,399	0,534	0,399	0,496
		Max	0,430	0,698	0,437	0,629

Quellen: Zimmermann 1982, Sell 1997, Lohmann 1998, Wagenführ 2004, Wagenführ 2007, Hartmann 2009, FAO 2015, TFZ 2019

Nadelholz zeichnet sich gegenüber Laubholz durch eine geringere Darrdichte aus. Der Grund hierfür sind strukturelle Holzunterschiede (Niemz und Sonderegger 2017). Die durchschnittliche Darrdichte von Laubholz ist in Deutschland leicht höher als in der EU28. Dies liegt vermutlich an dem höheren Buchenanteil im deutschen Holzvorrat sowie dem höheren Birkenanteil im Holzvorrat der EU28 (FAO 2015). Der Heizwert im darrtrockenen Zustand ($HG_{i,(u=0)}$) ist für Deutschland und die EU28 identisch. Im Allgemeinen zeigt darrtrockenes Nadelholz einen höheren Heizwert als darrtrockenes Laubholz, da der Anteil an Lignin und akzessorischen Bestandteilen in Nadelhölzern höher ist (Krajnc 2015). Das differenzielle Quellmaß ist sowohl in Deutschland als auch der EU28 für Laubholz höher als für Nadelholz.

Trotz der verschiedenen Holzarteneigenschaften unterscheiden Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft oft nicht zwischen den Holzarten. Allerdings können verfügbare Informationen zur Holzherkunft (z. B. aus dem Wald, holzverarbeitende Industrie) dazu verwendet werden, die Holzartenzusammensetzung von Holzsortimenten zu schätzen (FAO 2017, Glasenapp und McCusker 2018). Tabelle 3 stellt die, für die energetische Holzverwendung im Haushaltssektor relevanten Holzsortimente dar. Außerdem werden Angaben zum Anteil an Nadelholz und der Holzfeuchte (u) gemacht.

Tabelle 3: Holzartenverteilung und Holzfeuchtegehalt nach Holzsortimenten, die für die energetische Holzverwendung im Haushaltssektor relevant sind

Kategorie	Holzsortimente	NH ³ in %		u in %	
		Deutschland	EU28		
Primärquellen	aus dem Wald	Industrielles Rundholz (IRW)	42	30	11..18..25
		Brennholz (BHW)	42	30	11..18..25
	nicht aus dem Wald	Industrielles Rundholz (IRA)	20	20	11..18..25
		Brennholz (BHA)	20	20	11..18..25
Sekundärquellen		Hackschnitzel und Sägespäne (HS)	96	86	5..25..63
		Schnittholzreste (SR)	67	86	5..25..63
		Rinde (RI)	67	86	5..25..63
		Holzkohle	-	-	-
		Holzpellets (HP)	93	86	8..9..11
		Holzbricketts (HB)	93	86	12..12..14
Tertiärquellen (GH)			90	86	24
Holz aus unbekanntem Quellen (UN)			42	30	5..18..63

Quellen: UN 1987, Simpson 1998, Alakangas 2005, Alakangas und Virkkunen 2007, Hartmann 2009, UNE-CE/FAO 2010, Weimar et al. 2012, TFZ 2014, Krajnc 2015, DEPI 2016, Bioenergy Europe 2018, Glasenapp und McCusker 2018, UNSD 2018, FAOSTAT 2019c, FAOSTAT 2019d, Mantau 2019, EN 14961-5:2011, ISO 17225-2:2014, ISO 17225-3:2014, ISO 17225-4:2014

Holzenergie aus primären Quellen umfasst Holz, das sowohl aus Waldflächen als auch anderen Flächen bezogen wird, um direkt oder im Anschluss an eine Lagerung verbrannt zu werden (Glasenapp und McCusker 2018). Der Anteil an Nadelholz aus dem Wald wurde anhand der Holzartenverteilung des durchschnittlichen Brennholzeinschlags aus dem Wald im Zeitraum von 2014 bis 2018 geschätzt. Nadelholz machte dabei 42 % und 30 % des Brennholzeinschlags in Deutschland bzw. der EU28 aus (Tabelle 3, FAOSTAT 2019d). Für die Holzfeuchte von Scheitholz mit Verwendung in Haushalten gibt die europäische Norm einen Holzfeuchtegehalt von bis zu 25 % an (EN 14961-5:2011). Dieser Wert umfasst die 18 % aus Simpson (1998) für die durchschnittliche Holzfeuchte von gelagertem Brennholz während einer Winterperiode in Deutschland. In anderen Berichten schwanken die Angaben zur Holzfeuchte zwischen 11 bis 25 % (UN 1987, Alakangas und Virkkunen 2007, Hartmann 2009, Krajnc 2015). Für die nachfolgenden Berechnungen der Umrechnungsfaktoren wird eine Holzfeuchte von 18 % angenommen.

Neben dem Wald kann Holz auch aus beispielsweise Gärten oder landwirtschaftlichen Flächen stammen. Dieses Holz wird als Holz aus Primärquellen außerhalb des Waldes bezeichnet (Glasenapp und McCusker 2018). Da Nadelhölzer in diesen Flächen seltener vorkommen, wird ein geringerer Nadelholzanteil von 20 % angenommen. Für die Holzfeuchte wurden die Werte für Holz aus dem Wald übernommen.

Holzenergie aus Sekundärquellen umfasst Nebenprodukte aus der Holzverarbeitenden Industrie. Nebenprodukte enthalten unverarbeitetes und festes Holz (z. B. Hackschnitzel, Schwarten und Rinde), flüssige Reststoffe (z. B. Schwarzlauge) sowie Energieholzprodukte (z. B. Holzpellets und -bricketts) (Glasenapp und McCusker 2018). Haushalte verwenden keine flüssigen Nebenprodukte aus der Holzverarbeitenden Indust-

³Der Laubholzanteil ist das Ergebnis aus: $LH = 100 - NH$.

rie (JWEE 2019, UNSD 2019b), weshalb diese Produkte von der Betrachtung ausgeschlossen wurden. Der Großteil der unverarbeiteten, festen Nebenprodukte besteht in Deutschland aus Nadelholz, da die Holzverarbeitende Industrie überwiegend Nadelholz einsetzt (Mantau 2019). Zur Schätzung des Nadelholzanteils in den Sortimenten Schnittholzreste sowie Hackschnitzel und Sägespäne in der EU28 wurde der durchschnittliche Einschlag von Starkholz- und Furnierholzstämmen im Zeitraum von 2014 bis 2018, differenziert nach Laub- und Nadelholz, verwendet (FAOSTAT 2019c). Der durchschnittliche Holzfeuchtegehalt für getrocknete, unverarbeitete und feste Nebenprodukte wurde mit 5 bis 63 % angegeben (ISO 17225-4:2014, TFZ 2014, Alakangas 2005, Weimar et al. 2012, Krajnc 2015). Obwohl auch höhere Holzfeuchten auftreten können, wird im Folgenden davon ausgegangen, dass der durchschnittliche Holzfeuchtegehalt in unverarbeiteten, festen Nebenprodukten bei 25 % liegt. Dies wird damit begründet, dass Holz mit höheren Holzfeuchten, aufgrund von technologischen Einschränkungen, in Haushalten nicht eingesetzt wird (UN 1987, Alakangas und Virkkunen 2007, Hartmann 2009, Weimar et al. 2012, Coffin 2014, TFZ 2014, EN 14961-5:2011). Für lose Rinde wurden die Eigenschaften von Schnittholzresten übernommen, da Rinde ähnliche Eigenschaften aufweist wie das zugehörige Holz (UNECE/FAO 2010).

Energieholzprodukte umfassen Holzpellets und -briketts sowie Holzkohle. Produzenten beziehen die Rohstoffe für die Herstellung von Holzpellets und -briketts aus der Holzverarbeitenden Industrie. Dies erklärt den hohen Anteil an Nadelholz in Energieholzprodukten (Bioenergy Europe 2018, Mantau 2019). Für Deutschland gab Bioenergy Europe (2018) an, dass 98 % des Rohstoffs zur Herstellung von Holzpellets und -briketts aus Nadelholz stammt. Angaben zum Einschlag von Starkholz- und Furnierholzstämmen verdeutlichen, dass der Nadelholzanteil mit 91 % geringer war (FAOSTAT 2019c). Dieser Wert ähnelt dem Ergebnis aus Mantau (2019) mit 93 %, das für die Berechnung der Umrechnungsfaktoren verwendet wird (Tabelle 3). Für die europäische Produktion von Holzpellets und -briketts geben Bioenergy Europe (2018) einen Anteil von 86 % Nadelholz an. Dieser Wert stimmt mit der Verteilung von Laub- und Nadelholz im Einschlag von Starkholz- und Furnierholzstämmen in der EU28 überein (FAOSTAT 2019c). Der durchschnittliche Holzfeuchtegehalt von Holzpellets liegt bei 8 bis 11 % (Alakangas und Virkkunen 2007, Weimar et al. 2012, ISO 17225-2:2014, Krajnc 2015). Holzbriketts weisen mit 12 bis 14 % einen höheren Holzfeuchtegehalt auf (DEPI 2016, ISO 17225-3:2014).

In der internationalen Energiestatistik wird zwischen Biobrennstoffen als primäres Produkt (inkl. Holzbrennstoffe) und Holzkohle als sekundäres Produkt unterschieden. Der Heizwert von Holzkohle wird mit 14,9..29,5..58,0 MJ/kg angegeben und im Folgenden als Standardwert übernommen (UNSD 2018).

Holz aus tertiären Quellen umfasst Gebrauchtholz, das ursprünglich z. B. als Massivholzprodukt, Verpackung oder in Möbeln Verwendung fand (BMJV 2017a, BMJV 2017b). Die Dominanz von Nadelholz bei Gebrauchtholz kann durch die überwiegende Verwendung von Nadelholz in diesen Bereichen erklärt werden (FAOSTAT 2019b). Der durchschnittliche Holzfeuchtegehalt in Holz aus tertiären Quellen wurde für Deutschland mit 24 % angegeben und für die Mitgliedsländer der EU28 übernommen (Weimar et al. 2012). Für Holz aus unbekanntem Quellen wird davon ausgegangen, dass die Holzartenverteilung und der Holzfeuchtegehalt mit denen von Holz aus Waldflächen übereinstimmt.

Tabelle 2 und Tabelle 3 bieten alle Informationen, die für die Berechnung von Umrechnungsfaktoren benötigt werden. Die Umrechnung von Festmeter Holz in Energieeinheiten erfolgt in zwei Schritten. Zuerst werden, mithilfe der Rohdichte, Volumen- in Gewichtseinheiten umgerechnet. Im Anschluss erfolgt die Umrechnung von Gewicht- in Energieeinheiten durch den Heizwert bei gegebener Holzfeuchte.

Formel 1 stellt die formalen Zusammenhänge von Rohdichte ($\rho_{(u)}$), Darrdichte (ρ_0), Holzfeuchte (u) und differenziellem Quellmaß (β_v) dar und ermöglicht die Umrechnung von Volumen- in Gewichtseinheiten (Niemz und Sonderegger 2017).

$$\rho_{(u)} = \rho_0 * \frac{1+u}{1+\beta_v * \min(u; 0,3)} \quad (1)$$

Die Berechnung des Heizwertes bezüglich des Gewichts ($HG_{i,(u)}$) bei gegebener Holzfeuchte (u) erfolgt nach Formel 2,

$$HG_{i,(u)} = H_{i,(u=0)} * \left(1 - \frac{u}{1+u}\right) - H_{H_2O} * \frac{u}{1+u}, \quad (2)$$

wobei $H_{i,(u=0)}$ für den Heizwert bei einer Holzfeuchte von $u = 0\%$ und H_{H_2O} für die Enthalpie des Wassers bei einer Temperatur von 25 °C ($2,44\text{ MJ/kg}$) steht (Kollmann 1951, Hartmann 2009). Die Multiplikation von Formel 1 und Formel 2 liefert den Heizwert in Bezug auf das Volumen ($HV_{(u)}$) bei gegebener Holzfeuchte (Formel 3). Mit $HV_{(u)}$ kann der Holzverbrauch von Festmeter in Energieeinheiten umgerechnet werden.

$$HV_{(u)} = \rho_{(u)} * HG_{i,(u)} \quad (3)$$

2.2 Ergebnisse

Tabelle 4 zeigt die Faktoren zur Umrechnung von Gewichtseinheiten in Energieeinheiten ($HG_{i,(u)}$) und Volumeneinheiten in Energieeinheiten ($HV_{(u)}$) für Deutschland und die EU28. Für die Berechnung von $HG_{i,(u)}$ wurde Formel 2 und für $HV_{(u)}$ Formel 3 sowie Informationen aus Tabelle 2 und Tabelle 3 verwendet. Für die einzelnen Mitgliedsländer der EU28 sind Umrechnungsfaktoren in Anhang A.III und A.IV dargestellt.

Wie in Tabelle 4 zu sehen ist, liegen die Faktoren für $HG_{i,(u)}$ in Deutschland zwischen $14,36$ und $17,05\text{ MJ/kg}$. Für die gesamte EU28 sind Werte von $14,51$ bis $17,00\text{ MJ/kg}$ angegeben. Nach Holzpellets und -briketts weist Holz aus Primärquellen die höchsten Energiewerte im Verhältnis zum Gewicht auf. Bei Holz aus Sekundärquellen haben unverarbeitete, feste Nebenprodukte die kleinsten Heizwerte. Regionale Unterschiede zwischen Deutschland und der EU28 sind gering.

Ergebnisse für $HV_{(u)}$ liegen bei 7.638 bis 10.252 MJ/m^3 in Deutschland und 7.953 bis 9.965 MJ/m^3 in EU28. Es fällt auf, dass die Sortimente mit den höchsten $HV_{(u)}$ -Faktoren nicht dieselben Sortimente sind wie die für $HG_{i,(u)}$. Beispielsweise hat Holz aus Primärquellen die höchsten Energiewerte im Verhältnis zum Volumen. Heizwerte in Relation zum Gewicht waren für Holzpellets am höchsten.

Tabelle 4: Heizwerte nach Holzsortimenten in Deutschland und der EU28

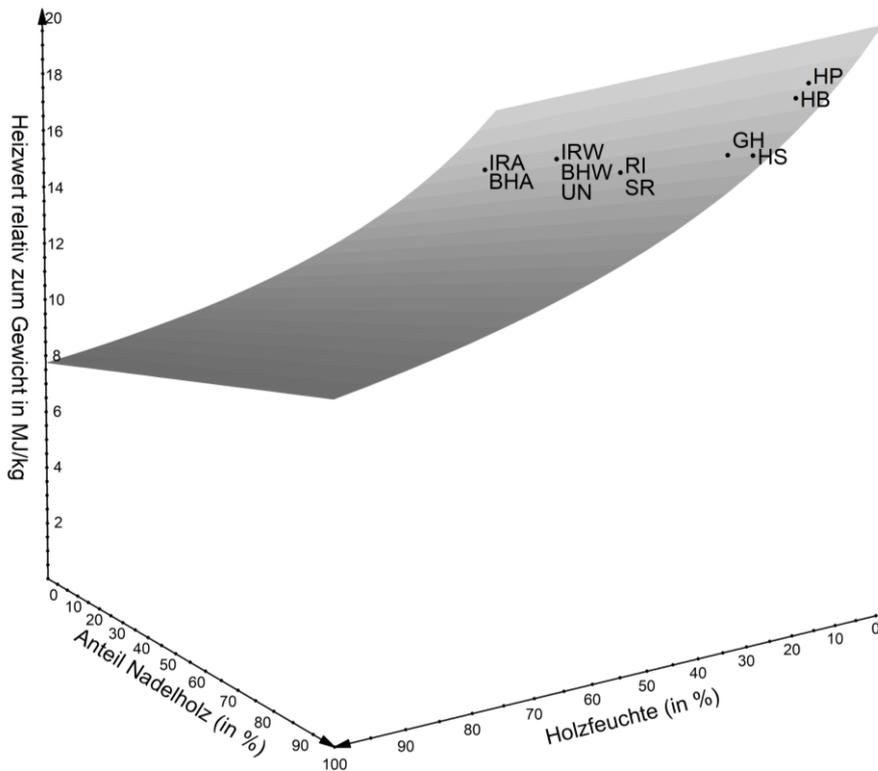
Kategorie	Holzsortimente	Deutschland		EU28	
		$HG_{i,(u)}$ [MJ/kg]	$HV_{(u)}$ [MJ/m ³]	$HG_{i,(u)}$ [MJ/kg]	$HV_{(u)}$ [MJ/m ³]
Waldfläche	Industrielles Rundholz (IRW)	15,16	9.594	15,07	9.705
	Brennholz (BHW)	15,16	9.594	15,07	9.705
Primärquellen	außerhalb von Waldflächen				
	Industrielles Rundholz (IRA)	14,99	10.252	14,99	9.965
	Brennholz (BHA)	14,99	10.252	14,99	9.965
Sekundärquellen	Hackschnitzel und Sägespäne (HS)	14,57	7.638	14,51	7.953
	Schnittholzreste (SR)	14,36	8.498	14,51	7.953
	Rinde (RI)	14,36	8.498	14,51	7.953
	Holzkohle	^{a)} 29,5	-	^{a)} 29,5	-
	Holzpellets (HP)	17,05	8.397	17,00	8.647
	Holzbricketts (HB)	16,52	8.265	16,48	8.510
Tertiärquellen (GH)		14,67	7.859	14,65	7.994
Holz aus unbekanntem Quellen (UN)		15,16	9.594	15,07	9.705

Quelle: ^{a)} UNSD 2018

Die Werte der Umrechnungsfaktoren variieren in Abhängigkeit der Holzsortimente. Für das Beispiel Deutschland sind in Abbildung 1 die Auswirkung von Änderungen der Holzartenzusammensetzung und Holzfeuchte auf die Umrechnungsfaktoren grafisch dargestellt. Die Punkte auf den Flächen symbolisieren die Positionen der Umrechnungsfaktoren einzelner Holzsortimente aus Tabelle 4. IRW und BHW stehen für industrielles Rundholz und Brennholz aus dem Wald. IRA und BHA sind Abkürzungen für industrielles Rundholz und Brennholz, das nicht aus dem Wald bezogen wird. Holzenergie aus Sekundärquellen umfasst unverarbeitete, feste Nebenprodukte: Hackschnitzel und Sägespäne (HS), Schnittholzreste (SR) und Rinde (RI). Die Abkürzungen für Holzpellets und –bricketts sind HP bzw. HB. Holz aus tertiären Quellen wird mit GH und Holz aus unbekanntem Quellen mit UN abgekürzt.

Der Heizwert in Relation zum Gewicht ($HG_{i,(u)}$) zeigt die größten Werte bei einer Holzfeuchte von $u = 0 \%$. Bei zunehmenden Werten für die Holzfeuchte, nehmen die Werte des Heizwertes in einem nicht-linearen Verlauf ab. Ein zunehmender Anteil an Nadelholz erhöht $HG_{i,(u)}$. Allerdings sind die Auswirkungen von Änderungen in der Holzartenzusammensetzung im Vergleich zu Änderungen in der Holzfeuchte gering. Der Heizwert im Verhältnis zum Volumen ($HV_{(u)}$) verringert sich mit zunehmender Holzfeuchte, wenn $u \leq 30 \%$. Bei Werten von $u > 30 \%$ haben Holzfeuchteänderungen lediglich einen kleinen Effekt auf $HV_{(u)}$. Außerdem vermindern zunehmende Nadelholzanteile $HV_{(u)}$.

a) Heizwert im Verhältnis zum Gewicht ($HG_{i,(u)}$) in MJ/kg.



b) Heizwert im Verhältnis zum Volumen ($HV_{(u)}$) in MJ/m³.

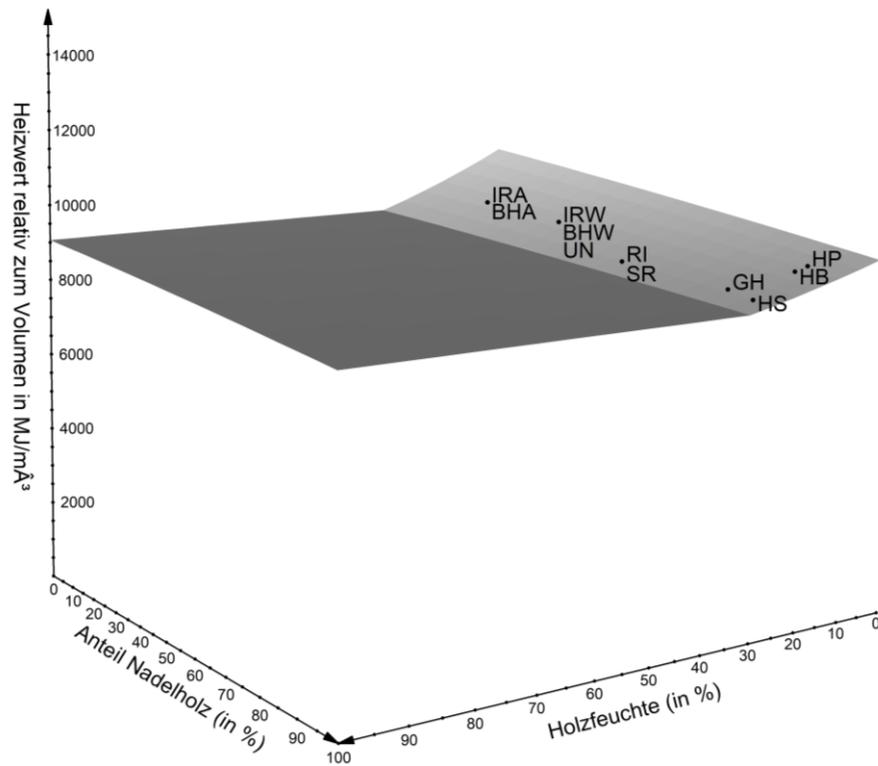


Abbildung 1: Auswirkungen von Änderungen in der Holzartenzusammensetzung und Holzfeuchte auf den Heizwert in Deutschland

2.3 Diskussion

Die Ergebnisse für Deutschland (14,36 bis 17,05 MJ/kg) und die EU28 (14,51 und 17,00 MJ/kg) ähneln den Angaben aus Krajnc (2015) mit Faktoren von 12,2 bis 17,0 MJ/kg für Holzpellets, Hackschnitzel und Feuerholz. Frondel et al. (2015) gaben für Stückholz und Hackschnitzel einen Faktor von 14,31 MJ/kg an. Außerdem entsprechen die Werte den Empfehlungen der Energiestatistiken für Brennholz, Restholz, Nebenprodukte und Holzpellets, exklusive Holzkohle und Schwarzlaube (7,9..15,6..31,0 MJ/kg), die sich auf alle Sektoren, inklusive des Haushaltssektors, beziehen. Der hohe Wert von 31,0 MJ/kg in der Energiestatistik verwundert allerdings (UNSD 2018). Formel 2 impliziert, dass der Heizwert in Relation zum Gewicht ($HG_{i,(u)}$) nicht größer sein kann als $HG_{i,(u=0)}$. In Europa weist die Tanne mit 19,0 MJ/kg den höchsten Wert für $HG_{i,(u=0)}$ auf, was deutlich kleiner ist als der höchste Wert in den Empfehlungen der Energiestatistik (vgl. Anhang A.I, Zimmermann 1982, UNSD 2018, TFZ 2019).

Sortimentspezifische Umrechnungsfaktoren liegen für Holzpellets vor. Von UNSD (2018) sind Werte von 17,3 MJ/kg angegeben. Bei Hartmann (2009) und Krajnc (2015) sind die Werte mit 17,1 MJ/kg und 17,0 MJ/kg leicht niedriger. Die berechneten Werte für Holzpellets in Deutschland (17,05 MJ/kg) und der EU28 (17,00 MJ/kg) stimmen gut mit den Literaturangaben überein. Die Werte aus Frondel et al. (2015) scheinen im Vergleich, mit 19,48 MJ/kg, zu hoch angesetzt.

Unterschiede in $HG_{i,(u)}$ können durch verschiedene Ausgangswerte für $HG_{i,(u=0)}$ (vgl. Tabelle 2) und der Holzfeuchte (vgl. Tabelle 3) erklärt werden. Im Allgemeinen zeigt Nadelholz höhere Werte für $HG_{i,(u=0)}$ als Laubholz, was die höheren Umrechnungsfaktoren bei höherem Nadelholzanteil erklärt. Allerdings zeigt das Beispiel für Deutschland, dass Änderungen in der Holzartenzusammensetzung keine großen Auswirkungen auf $HG_{i,(u)}$ haben. Änderungen in der Holzfeuchte beeinflussen die Ergebnisse der Umrechnungsfaktoren wesentlich stärker (Hartmann 2009).

Die Verwendung von Volumeneinheiten in den Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft (UNECE/FAO 2010) erfordert entsprechende Faktoren, um Volumen- in Energieeinheiten umzurechnen. Die Empfehlungen für die Energiestatistik geben keine Umrechnungsfaktoren für Volumeneinheiten an (UNSD 2018). Allerdings können die Ergebnisse aus Tabelle 4 mit holzartenspezifischen Ergebnissen aus dem Berechnungsprogramm von Hagauer et al. (2008) bestätigt werden, wenn das Programm Angaben zur Holzfeuchte aus Tabelle 3 verwendet.

Der Einfluss der sortimentspezifischen Rohdichte bei der Berechnung von $HV_{i,(u)}$ (Formel 3) verdeutlicht, warum die höchsten Faktoren für $HV_{i,(u)}$ nicht mit denen für $HG_{(u)}$ übereinstimmen. Außerdem führt die Berücksichtigung der Rohdichte dazu, dass $HV_{i,(u)}$ anders auf Holzfeuchteänderungen reagiert als $HG_{(u)}$. Die größten Änderungen bei $HV_{i,(u)}$ treten bei Holzfeuchteänderungen unterhalb Fasersättigung auf, was durch Hartmann (2009) bestätigt wird. Da im Haushaltssektor eingesetzte Holzsortimente häufig unterhalb der Fasersättigung getrocknet werden (EN 14961-5:2011, ISO 17225-4:2014, ISO 17225-2:2014, ISO 17225-3:2014), darf die Volumenänderungen unterhalb Fasersättigung nicht vernachlässigt werden.

Im Folgenden wird mit Hilfe der Ergebnisse die Vergleichbarkeit zwischen Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft und des Energiesektors hergestellt. In Kapitel 3.5 betrifft dies die Zeitreihen zum Brennholzeinsatz im deutschen Haushaltssektor und in Kapitel 6 die Angaben aus der internationalen Statistik der Forst- und Holzwirtschaft.

3 Statistiken zur energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor in Deutschland

In Deutschland werden amtliche Daten und Statistiken der Energieverwendung im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) gesammelt und veröffentlicht. Die Daten umfassen unter anderem Zeitreihen zur energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor (Ziesing et al. 2012, BMWi 2018a). Darüber hinaus befassten sich verschiedene Forschungsprojekte mit der empirischen Bestimmung der energetischen Holzverwendung in Haushalten (Mantau 2004, Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016, Mantau 2015, Mantau 2019, Jochem et al. 2015, TI-WF 2019, Frondel et al. 2007, Frondel et al. 2011, Frondel et al. 2013, Frondel et al. 2015). Im Folgenden werden die wichtigsten Literaturangaben und Querbezüge vorgestellt und anschließend in Kapitel 3.5 diskutiert.

Es sei angemerkt, dass der gesamte Holzeinsatz ohne Holzkohle dargestellt wird. Mit einem Anteil von bis zu 2 % am Holzeinsatz im Haushaltssektor stellt Holzkohle einen kleinen Mengenstrom dar (FAOSTAT 2019a, JWEE 2019), der weniger zum Heizen des Wohnungsbestands als bei Freizeitaktivitäten (z. B. zum Grillen) Verwendung findet (Meier 2009). Außerdem wurde Holzkohle in bisherigen Studien zum Holzeinsatz in Haushalten nicht betrachtet (Mantau 2004, Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016, Frondel et al. 2007, Frondel et al. 2011, Frondel et al. 2013, Frondel et al. 2015) und von der internationalen Energiestatistik als Sekundärenergieträger, getrennt vom Primärenergieträger Holz, erfasst (UNSD 2018).

3.1 Amtliche Energiestatistik

Für den deutschen Energiesektor bilanziert die Arbeitsgruppe Energiebilanzen (AGEB) die sektorale Verwendung von Energieträgern. Aus den Daten der AGEB erstellt das BMWi die amtliche Energiebilanz für Deutschland. Erneuerbare Energien werden in der Energiebilanz stark aggregiert abgebildet. Detailliertere Informationen finden sich in der Satellitenbilanz für erneuerbare Energien. Die AGEB bezieht Informationen zu erneuerbaren Energien, inklusive dem energetischen Holzverbrauch im Haushaltssektor, von der Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat). Als unabhängiges Fachgremium erstellt AGEE-Stat seit dem Jahr 2004, Daten und Statistiken zu erneuerbaren Energien in Deutschland (Ziesing et al. 2012, BMWi 2018a).

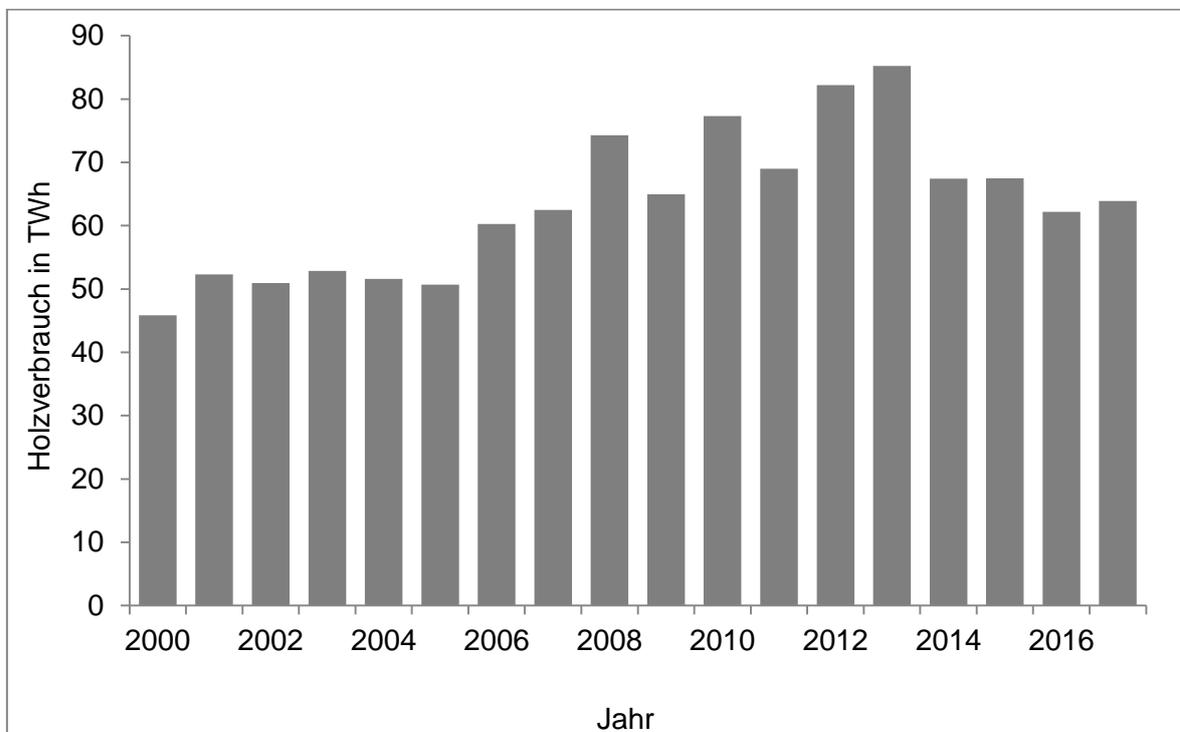
Sowohl AGEE-Stat als auch AGEB veröffentlichen Zeitreihen zum energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor, die sich zum Teil deutlich voneinander unterscheiden. In Kapitel 3.1.1 wird die Zeitreihe der AGEE-Stat vorgestellt. In Kapitel 3.1.2 wird die Zeitreihe der AGEB zum energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor dargestellt und mit der Zeitreihe von AGEE-Stat verglichen.

3.1.1 Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik

Die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien-Statistik (AGEE-Stat) erstellt die offizielle und aktuellste Zeitreihe für den energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor in Deutschland. Bis ins Jahr 2004 stammen die Angaben zum energetischen Holzeinsatz (ohne Holzkohle) im Haushaltssektor aus Befragungsergebnissen der Rheinbraun Brennstoff

GmbH (vgl. Kapitel 3.4). Ab dem Jahr 2005 stammen Verbrauchsangaben aus den Ergebnissen des Projekts Rohstoffmonitoring Holz (BMW 2018a). Auf Grundlage von empirischen Haushaltsbefragungen wird in diesem Projekt der energetische Holzeinsatz im gesamten Wohnungsbestand für ausgewählte Jahre erfasst (Mantau 2019). Für die Jahre in denen keine empirischen Daten vorliegen, werden Verbrauchswerte nach Jochem et al. (2015) und TI-WF (2019) geschätzt (vgl. Kapitel 3.2).

In Abbildung 2 ist die zeitliche Entwicklung des energetischen Holzeinsatzes im Haushaltssektor in den Jahren 2000 bis 2017 dargestellt. Die Zeitreihe wird im Folgenden als AGEE-Stat-Zeitreihe bezeichnet. Bis ins Jahr 2005 lag der energetische Holzeinsatz relativ konstant bei durchschnittlich 51 TWh. Ab dem Jahr 2006 stieg der Holzeinsatz an und zeichnet sich durch stärkere Verbrauchsschwankungen aus. Besonders in den Jahren 2008 (74 TWh), 2010 (77 TWh), 2012 (82 TWh) und 2013 (85 TWh) sind hohe Verbrauchswerte zu erkennen, die auf kalte Witterungsverhältnisse und hohe Verbraucherpreise für fossile Energieträger zurückzuführen sind (vgl. Kapitel 3.2, BMW 2018a).



Quelle: BMW 2018a

Abbildung 2: AGEE-Stat-Zeitreihe zum energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor

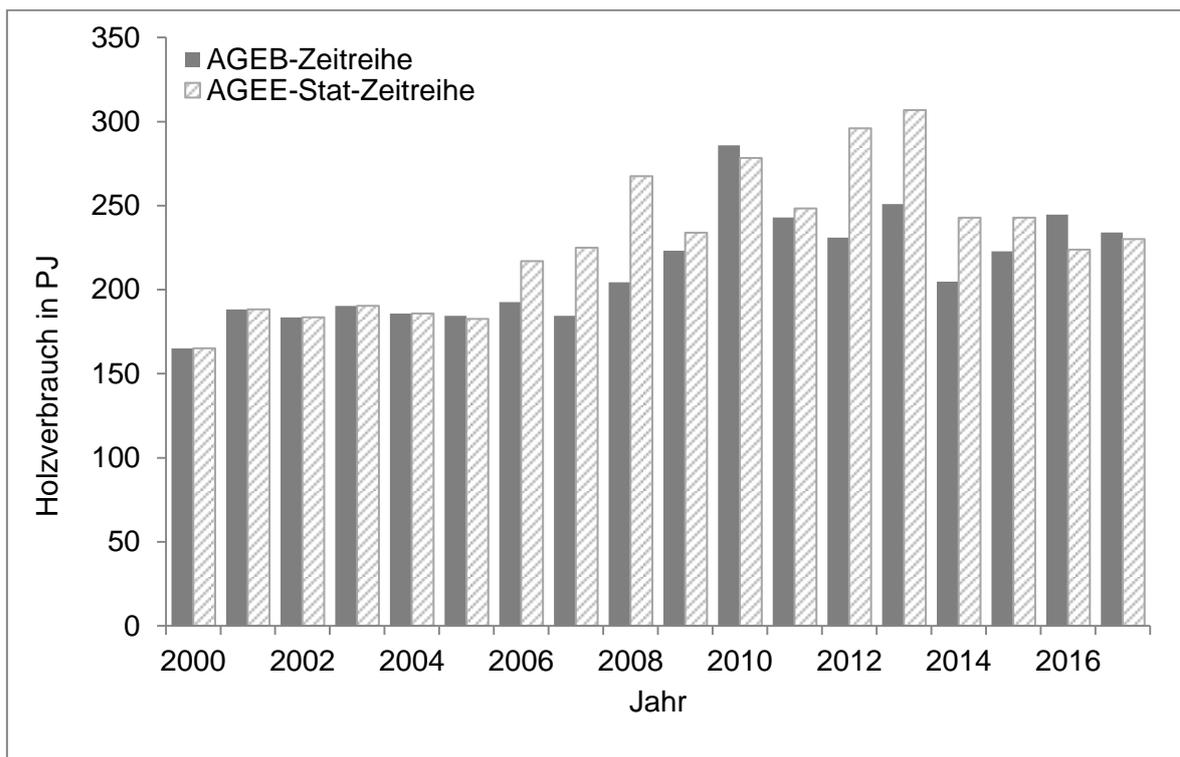
Informationen zur energetischen Nutzung von Holzsortimenten werden in der amtlichen Energiestatistik nicht ausgewiesen. Allerdings wären solche Informationen für eine Bewertung der Auswirkungen auf z. B. die Konkurrenz mit der stofflichen Holznutzung notwendig (vgl. Kapitel 4.1).

3.1.2 Arbeitsgruppe Energiebilanzen

Die Arbeitsgruppe Energiebilanzen (AGEB) weist den energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor in der Satellitenbilanz für erneuerbare Energien unter dem Brennstoffnamen „feste biogene Stoffe und Klärschlamm“ aus (bis 2012: „Holz, Stroh und andere

festen Stoffe“, AGEB 2019). Bis ins Jahr 2009 basieren die Angaben auf Ergebnissen von jährlichen Befragungen im Auftrag der Rheinbraun Brennstoff GmbH (vgl. Kapitel 3.4). Für die Jahre 2008 und 2009 wurde der erfasste Holzeinsatz um Informationen vom Deutschen Pelletverband (DEPV) zum Verbrauch von Holzpellets erweitert (Wernicke 2019). Ab dem Jahr 2010 wurden die Zahlen von den Erhebungsergebnissen aus Frondel et al. (2013) und Frondel et al. (2015) abgeleitet. Für die Erstellung der zukünftigen Zeitreihen werden ab dem Jahr 2018 die Angaben aus dem Projekt Rohstoffmonitoring Holz nach TI-WF (2019) verwendet (vgl. Kapitel 3.1.1 und 3.2, Nieder 2019).

Die Zeitreihe der AGEB ist in Abbildung 3 für die Jahre 2000 bis 2017 dargestellt und wird im Folgenden als AGEB-Zeitreihe bezeichnet. Durch die Verwendung der gleichen Datenbasis sind bis ins Jahr 2005 keine Unterschiede zwischen den AGEB- und AGEE-Stat-Zeitreihen⁴ zu erkennen. Ab dem Jahr 2005 treten zum Teil deutliche Unterschiede auf. Insbesondere in den Jahren 2008, 2012 und 2013 sind Unterschiede zu erkennen. Die AGEE-Stat-Zeitreihe wurde ab dem Jahr 2005 rückwirkend durch Ergebnisse des Rohstoffmonitoring Holz ersetzt (vgl. Kapitel 3.2). Verbrauchsangaben in der Satellitenbilanz der AGEB wurden nicht aktualisiert, was die Unterschiede zur AGEE-Stat-Zeitreihe erklärt. Informationen zur energetischen Verwendung einzelner Holzsortimente sind in den Angaben der AGEB nicht enthalten.



Quellen: BMWi 2018a, AGEB 2019

Abbildung 3: Vergleich der AGEB- und AGEE-Stat-Zeitreihen zum energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor

⁴ Umrechnung von GWh in PJ nach Kapitel 2.3.

3.2 Rohstoffmonitoring Holz-Zeitreihe

In Zusammenarbeit von Informationssysteme für Rohstoffe (INFRO), der Universität Hamburg und dem Thünen-Institut wird im Projekt Rohstoffmonitoring Holz die stoffliche und energetische Verwendung von Holz in Deutschland erfasst. Das Projekt wurde von verschiedenen Verbänden der Holzwirtschaft initiiert und finanziell unterstützt. Derzeit übernimmt die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e. V. (FNR) im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) die Finanzierung. Die Erfassung der Holzverwendung erfolgt für ausgewählte Jahre und Verwendungssektoren des Holzmarkts. Zum Holzmarkt gehören unter anderem Energieholznutzer, Sägewerke und Holzwerkstoffproduzenten (vgl. Kapitel 4.1, Mantau 2015, Mantau 2019). Ergebnisse zur energetischen Holznutzung fließen auf nationaler Ebene in die offizielle Energiebilanz ein (vgl. Kapitel 3.1). Außerdem werden die Ergebnisse für die internationale Berichterstattung verwendet (vgl. Kapitel 6). Derzeit bietet das Projekt die einzigen wiederkehrenden und empirischen Erhebungen zum energetischen Holzeinsatz in deutschen Haushalten.

3.2.1 Methodisches Vorgehen

Für die Ermittlung des Holzeinsatzes im Haushaltssektor wurden Stichprobenerhebungen zu den Jahren 2000, 2005, 2007, 2010 und 2014 durchgeführt. Die Befragungen erfolgten nach Ablauf der Erhebungsjahre⁵ in schriftlichen Mehrthemenbefragungen. Bei jeder Befragung machten 8.773 bis 12.709 zur Teilnahme verpflichtete Haushalte Angaben zu ihrem individuellen Holzeinsatz sowie zu sozioökonomischen Merkmalen. Die Stichprobenauswahl erfolgte unter Berücksichtigung der Repräsentativität bezüglich der regionalen Verteilung, Haushaltsgröße, Altersstruktur und des Beschäftigungsverhältnisses des Haushaltsvorstandes. Haushalte konnten ihren spezifischen Holzeinsatz differenziert nach Holzsortimenten⁶ sowie in Volumen- und Masseinheiten⁷ angeben (Mantau 2004, Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016).

Insgesamt gaben 1.841 bis 2.858 Haushalte an, Holzenergie zu verwenden. Hierbei ist zu beachten, dass die Anzahl der Angaben zum Einsatz spezifischer Holzsortimente deutlich geringer sein kann. Beispielsweise machten 984 bis 1.444 Haushalte Angaben zur Verwendung von Waldscheitholz (Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016, Glasenapp et al. 2019b). 35 Haushalte gaben im Jahr 2014 an, Hackschnitzel zu verwenden (Döring et al. 2016).

Für die Berechnung des energetischen Holzeinsatzes nach Sortimenten im gesamten Wohnungsbestand wurde der durchschnittliche Einsatz von Holzsortimenten stratifiziert nach Bewohnergruppen⁸ bestimmt. Die Multiplikation der durchschnittlichen Verbrauchs-

⁵ Die Befragungen wurden im April 2006 für 2005, im April 2008 für 2007, im Juli 2011 für 2010 und im April 2015 für 2014 durchgeführt. Für das Jahr 2000 ist der Erhebungszeitpunkt nicht bekannt.

⁶ Holzsortimente: Scheitholz aus dem Wald (ab 2005), Scheitholz aus dem Garten (ab 2005), Scheitholz aus der Landschaftspflege (ab 2005), Altholz (inkl. Gebrauchtholz, Abbruchholz und Schnittholzreste aus der eigenen Verarbeitung, ab 2005), Schnittholzreste aus der industriellen Holzverarbeitung, Hackschnitzel, Holzpellets, Holzbriketts und sonstiges Holz

⁷ Kilogramm, Standardpackung (4 kg), Raummeter, Schüttraummeter und Festmeter

⁸ Bewohnergruppen: Eigentümer im Ein-/Zweifamilienhaus, Mieter im Ein-/Zweifamilienhaus, Eigentümer im Mehrfamilienhaus, Mieter im Mehrfamilienhaus sowie Vermieter eines Ein-

werte mit Angaben zum Wohnungsbestand (Mikrozensus 2008, Mikrozensus 2012, Mikrozensus 2016) ergab den gesamten energetischen Einsatz von Holzsortimenten (Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016).

Mit geeigneten Informationen über die Einflüsse auf den Holzverbrauch im Haushaltssektor kann der energetische Holzverbrauch für die Jahre bestimmt werden für die keine empirischen Daten vorliegen (Mantau 2019, Jochem et al. 2015, TI-WF 2019). Mantau (2019) schätzte den energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor anhand klimatischer Einflüsse, Preise für fossile Energieträger und Subventionen des Marktanreizprogramms. Die Zeitreihe wird im Folgenden als RM-Holz-Zeitreihe bezeichnet. Auf Grundlage derselben empirischen Verbrauchsdaten modellierten TI-WF (2019) den energetischen Holzeinsatz über eine in Jochem et al. (2015) vorgestellte Methode. Hierbei wird der jährliche Holzverbrauch durch Änderungen von Heizgradtagen und der Verbraucherpreise für fossile Energieträger bestimmt. Die entsprechende Zeitreihe wird im Folgenden als TI-WF-Zeitreihe bezeichnet. Die verwendeten Verbraucherpreisindizes für fossile Energieträger berechnen sich aus den Preisindizes für Gas, Heizöl, Fernwärme und Strom, gewichtet nach der Heizungsstruktur in Deutschland (Jochem et al. 2015). Heizgradtage, als Maß für die Kälte einer Heizperiode, werden nach Formel 4, mit \bar{t}_d als durchschnittliche Tagestemperatur, berechnet (VDI 3807).

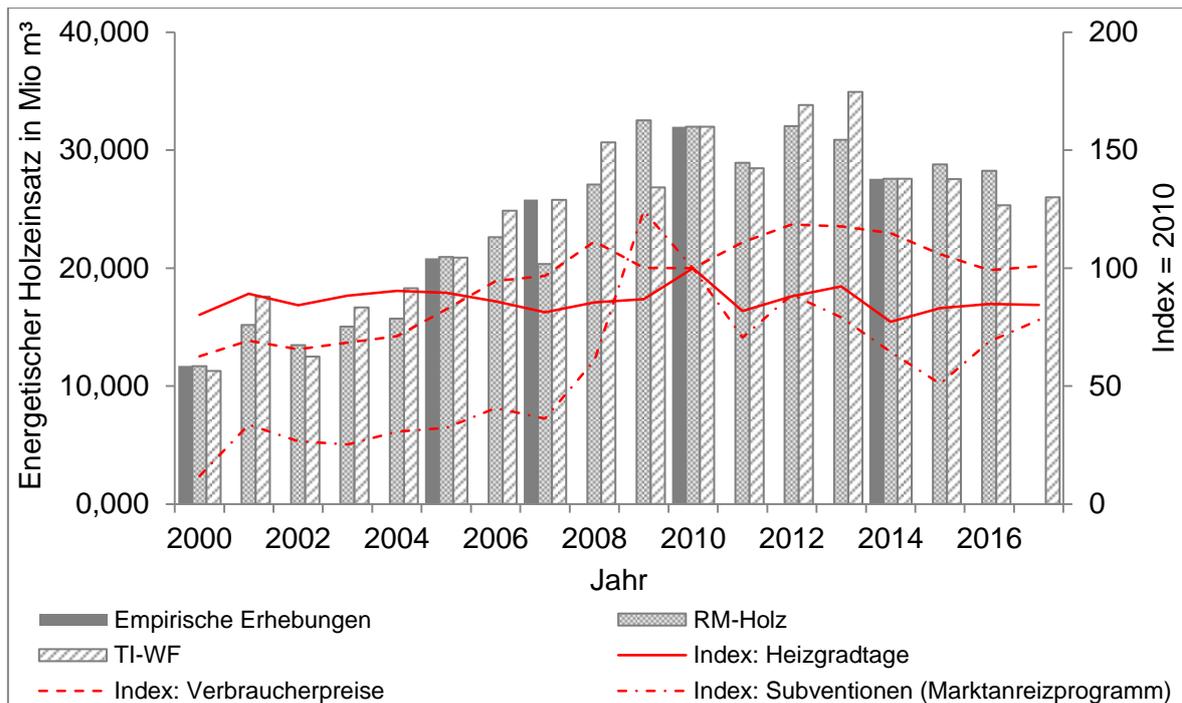
$$GTZ = \sum_{d=1}^{365} \begin{cases} (20^{\circ}C - \bar{t}_d), & \bar{t}_d < 15^{\circ}C \\ 0, & \bar{t}_d \geq 15^{\circ}C \end{cases} \quad (4)$$

3.2.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse aus dem Projekt Rohstoffmonitoring Holz legen nahe, dass der überwiegende Anteil (75 bis 83 %) der deutschen Haushalte kein Holz zur Energieversorgung verwendet. Allerdings ist im zeitlichen Verlauf festzustellen, dass der Anteil an Holzheizern von 17 % im Jahr 2005 auf 21 % im Jahr 2014 anstieg. 3 % aller Haushalte verwendeten Holz in Zentralheizungen (Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016).

In Abbildung 4 sind die Ergebnisse zum Holzeinsatz aus den empirischen Erhebungen der Jahre 2000, 2005, 2007, 2010 und 2014 dargestellt. Die Ergebnisse wurden rückwirkend einer Revision unterzogen, weshalb im Folgenden die nach Döring et al. (2016) aktualisierten Angaben vorgestellt werden. Im Jahr 2000 lag der energetische Holzeinsatz in Haushalten bei 12 Mio. m³. In den Jahren 2005 und 2007 betrug der energetische Holzeinsatz 21 bzw. 26 Mio. m³. In den Jahren 2010 und 2014 waren die Holzverbräuche mit 32 Mio. m³ und 28 Mio. m³ am höchsten (Mantau 2004, Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016).

/Zweifamilienhauses und Vermieter eines Mehrfamilienhauses (bzw. in Döring et al. 2016: Heizungstypen statt Vermieter)



Quellen: Mantau 2004, Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016, DWD 2017, Destatis 2017, BDEW 2019, BMF 2019, TI-WF 2019, Mantau 2019

Abbildung 4: Ergebnisse des Rohstoffmonitoring Holz zum energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor und die zeitliche Entwicklung von erklärenden Variablen

Abbildung 4 zeigt außerdem Zeitreihen mit Schätzwerten für den energetischen Holzeinsatz sowie auf der Sekundärachse die Indizes für Heizgradtage, gewichtete Verbraucherpreise für fossile Energieträger und Subventionen des Marktanreizprogramms (DWD 2017, Destatis 2017, BDEW 2019, BMF 2019). In der RM-Holz-Zeitreihe nimmt der modellierte energetische Holzeinsatz in den Jahren 2000 bis 2010 kontinuierlich zu. Die Zunahme ist auf die steigenden Subventionsausschüttungen sowie steigende Preise für fossile Energieträger zurückzuführen. Im Zeitraum von 2010 bis 2014 wird der Holzverbrauch relativ konstant auf hohem Niveau geschätzt. Diese Entwicklung lässt sich durch das hohe Niveau der Verbraucherpreise für fossile Energieträger bei zeitgleichem Rückgang der Subventionen erklären. Der niedrigere Holzverbrauch ab dem Jahr 2014 ist insbesondere auf den Rückgang der Verbraucherpreise für fossile Energieträger zurückzuführen.

Die Angaben der TI-WF-Zeitreihe unterscheiden sich aufgrund der fehlenden Berücksichtigung von Subventionen von denen der RM-Holz-Zeitreihe. Beispielsweise wird der Holzeinsatz im Jahr 2009 in TI-WF deutlich niedriger geschätzt, was auf den hohen Wert für Subventionen in diesem Jahr zurückzuführen ist.

Neben dem gesamten Holzeinsatz lassen die Befragungsergebnisse auch Rückschlüsse auf die Herkunft des Holzes zu. Wie in Tabelle 5 zu sehen ist, wurden in den Befragungen bis zu neun Holzsortimente unterschieden (Mantau 2004, Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016).

Tabelle 5: Energetisch verwendete Holzsortimente im Haushaltssektor aus dem Rohstoffmonitoring Holz

Sortimente in Mio. m ³	2000	2005	2007	2010	2014
Scheitholz Wald	10,389	15,280	18,043	23,579	19,731
Scheitholz Garten		1,842	2,406	2,082	2,092
Landschaftspflegeholz		0,782	0,793	0,750	0,390
Gebrauchtholz		1,640	1,453	2,016	1,280
Schnittholzreste	1,054	0,683	1,865	0,841	0,759
Hackschnitzel	0,008	0,032	0,229	0,450	0,488
Holzpellets	0,044	0,188	0,513	1,627	2,288
Holzbriketts	0,222	0,398	0,487	0,604	0,520
Sonstiges Holz	0,000	0,000	0,022	0,038	0,029

Quellen: Mantau 2004, Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016

81 bis 89 % des Holzverbrauchs entfielen auf Scheitholz (inkl. Scheitholz aus dem Wald, Garten und der Landschaftspflege). Scheitholz aus dem Wald machte mit durchschnittlich 87 % den größten Anteil am Scheitholz aus. Lediglich 10 % bzw. 3 % des verwendeten Scheitholzes stammte aus dem Garten oder der Landschaftspflege. Seit dem Jahr 2000 ist ein Rückgang des Scheitholzanteils am gesamten Holzenergieverbrauch zu erkennen. Während im Jahr 2000 89 % des energetischen Holzeinsatzes auf Scheitholz entfiel, waren es im Jahr 2014 nur noch 81 %, obwohl die absolute Scheitholzverwendung in diesem Zeitraum von 10 auf 22 Mio. m³ zunahm (Mantau 2004, Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016).

Gebrauchtholz wurde erst ab dem Jahr 2005 erfasst. Ab dem Jahr 2005 sind die Gebrauchtholzanteile von 8 auf 5 % im Jahr 2014 gesunken. Der absolute Verbrauch lag bei 1 bis 2 Mio. m³. Der rückläufige Trend der Anteile von Scheitholz und Gebrauchtholz lässt sich unter anderem durch die Markteinführung von Holzpellets erklären. Der Anteil von Holzpellets am gesamten energetischen Holzeinsatz stieg von 0,4 % (0,04 Mio. m³) im Jahr 2000 auf 8,3 % (2,29 Mio. m³) im Jahr 2014. Schnittholzreste, Hackschnitzel und Holzbriketts machten einen geringen Anteil am häuslichen Brennholzverbrauch aus (Mantau 2004, Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016).

3.3 RWI/Forsa-Zeitreihe

Für den Zeitraum von 2004 bis 2013 erfassten das Leibniz-Institut für Wirtschaftsforschung (RWI) und Forsa: Gesellschaft für Sozialforschung und statistische Analysen mbH (Forsa) im Auftrag des BMWi den Einsatz von konventionellen Energieträgern⁹ und alternativen Technologien¹⁰ im Haushaltssektor (Frondelet et al. 2007, Frondelet et al. 2011, Frondelet et al. 2013, Frondelet et al. 2015). Die Zeitreihe wird im Folgenden als RWI/Forsa-Zeitreihe bezeichnet und stellte in der Vergangenheit die Grundlage für die offizielle Energiebilanzierung dar (vgl. Kapitel 3.1).

⁹ Strom, Erdgas, Heizöl, Fernwärme, Braunkohle, Flüssiggas und Steinkohle

¹⁰ Wärmepumpe, Solarwärmanlage, Photovoltaikanlage und Holzenergie

3.3.1 Methodisches Vorgehen

Zur Bestimmung des energetischen Holzeinsatzes wurden im Frühjahr¹¹ der Jahre 2007, 2010, 2012 und 2014 Haushaltsbefragungen durchgeführt. Bei den Befragungen ist zwischen der Ermittlung der Verbraucherstruktur und der Bestimmung des Holzeinsatzes zu unterscheiden (Frondelet al. 2007, Frondelet al. 2011, Frondelet al. 2013, Frondelet al. 2015).

Bei der Bestimmung der Verbraucherstruktur wurde der Anteil von mit Stückholz, Holzpellets sowie Hackschnitzeln und Holzbriketts heizenden Haushalten am gesamten Wohnungsbestand ermittelt. Die Grundlage hierfür bieten computer- bzw. fernsehergestützte Befragungen eines Haushaltspanels. Die Rekrutierung der Haushalte in das Panel erfolgte zufällig. In den Befragungen wurden 6.533 bis 8.561 Haushalte erfasst. Verzerrungen durch z. B. Antwortverweigerer wurde durch eine nachträgliche Gewichtung korrigiert (Frondelet al. 2007, Frondelet al. 2011, Frondelet al. 2013, Frondelet al. 2015). Des Weiteren wurden Telefonerhebungen durchgeführt, um beispielsweise die Struktur der Holzpelletnutzer besser zu erfassen. Im Jahr 2007 wurden 80.068 Haushalte und im Jahr 2012 30.016 Haushalte telefonisch befragt (Frondelet al. 2007, Frondelet al. 2013).

Die Menge des eingesetzten Stückholzes, Holzpellets oder von Hackschnitzeln und Holzbriketts wurde ebenfalls in den computer- bzw. fernsehergestützten Befragungen erfasst. Frondelet al. (2007), Frondelet al. (2011) und Frondelet al. (2013) befragten Haushalte zum Holzeinsatz in den vergangenen 2 bis 3 Jahren¹¹. Frondelet al. (2015) erfassten den Einsatz der Sortimente im Jahr 2013¹¹. Für die Jahre 2011 und 2012 wurden Verbrauchskennziffern anhand der Entwicklung von Heizgradtagen geschätzt. In allen Befragungen gaben die Haushalte den energetischen Einsatz der Holzsortimente in Volumen- oder Masseinheiten¹² an. Da nicht alle erfassten Haushalte Holz zum Heizen verwenden, ist die Stichprobengröße zur Bestimmung des spezifischen Holzeinsatzes im Allgemeinen deutlich kleiner als die der befragten Haushalte. Für Stückholz basieren die jährlich berechneten Verbrauchskennziffern auf Angaben von 700 bis 1.400 Haushalten. Für Holzpellets wurden die Stichprobenergebnisse teilweise um Informationen aus den Telefonbefragungen erweitert oder konstante Werte aus Vorjahresstudien übernommen. Im Allgemeinen werden Verbrauchskennziffern für Holzpellets auf Grundlage von 111 bis 115 Nennungen berechnet. Kennziffern zum Einsatz von Hackschnitzeln und Holzbriketts basieren auf den Angaben von 99 bis 326 Haushalten (Frondelet al. 2007, Frondelet al. 2011, Frondelet al. 2013, Frondelet al. 2015).

Die Hochrechnung des gesamten energetischen Holzeinsatzes im Haushaltssektor erfolgt für alle drei Sortimente (Stückholz, Holzpellets sowie Hackschnitzeln und Holzbriketts) durch Multiplikation des spezifischen Holzeinsatzes pro Wohnfläche, des Anteils an, durch Holzheizer, beheizter Wohnfläche und der gesamten Wohnfläche. Angaben zur gesamten Wohnfläche stammen aus dem Mikrozensus (Mikrozensus 2008, Mikrozensus 2012). Zusätzlich erfolgt die Hochrechnung des Stückholzeinsatzes stratifiziert nach Verwendungsart (Zentralheizung, Ofenheizung und Kamin), Gebäudekategorien (Einfamilienhaus, Zweifamilienhaus und Mehrfamilienhaus) und Regionen. Bei Holzpellets sowie

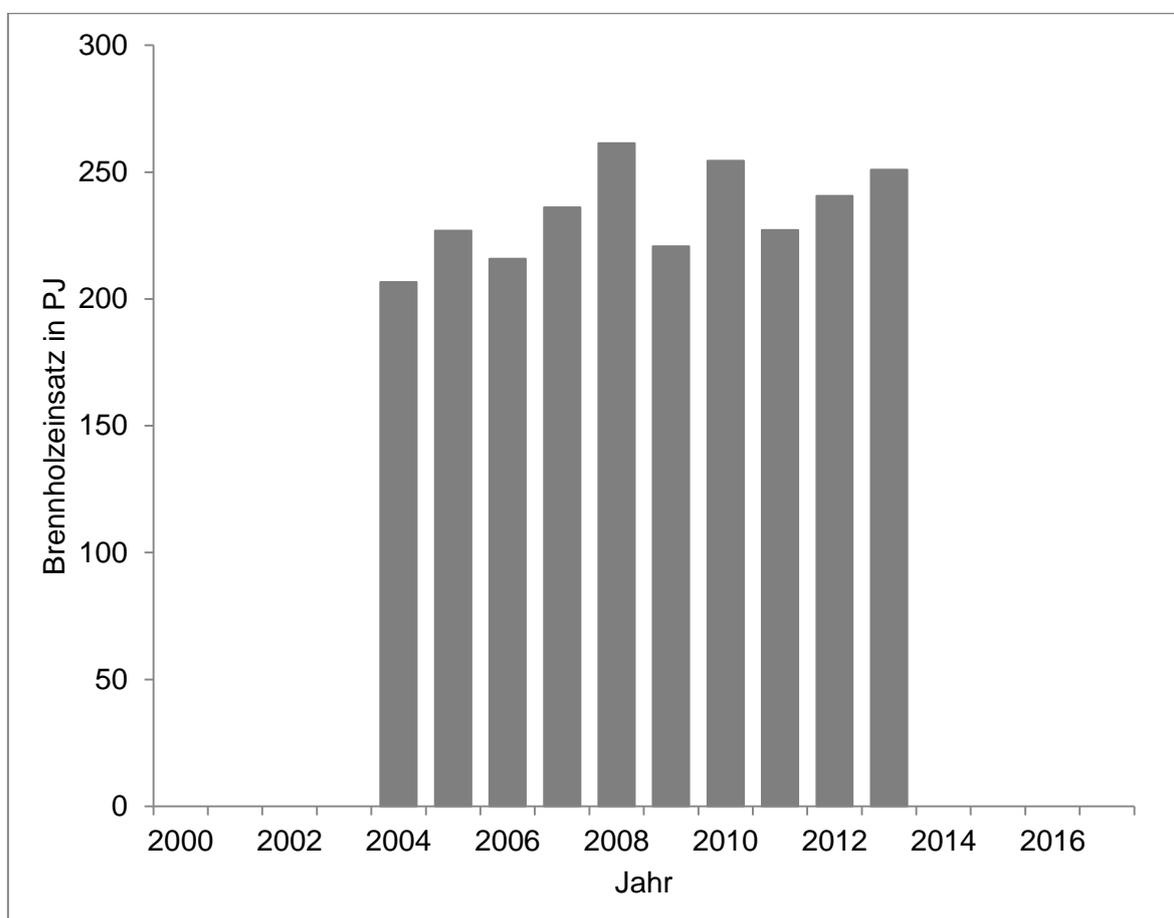
¹¹ Die Befragungen wurden im Mai 2007 für 2004 und 2005; April 2010 für 2006, 2007 und 2008; März 2012 für 2008, 2009 und 2010 sowie April 2014 für 2013 durchgeführt.

¹² Kilogramm, Raummeter, Schüttraummeter und Festmeter

Hackschnitzeln und Holzbriketts wird auf eine derartige Stratifizierung verzichtet (Frondelet al. 2007, Frondelet al. 2011, Frondelet al. 2013). Lediglich Frondelet al. (2015) stratifizieren vor der Hochrechnung auch bei Holzpellets sowie Hackschnitzeln und Holzbriketts.

3.3.2 Ergebnisse

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass zu Beginn des Jahres 2014 29,8 % der befragten Haushalte mit Stückholz heizten. Die überwiegende Mehrheit dieser Haushalte nutzte Stückholz allerdings nicht als primäre Energiequelle. Feuerungsanlagen für Holzpellets machten mit 2,3 % und Anlagen für Holz hackschnitzel oder Holz briketts mit 5,9 % einen deutlich geringeren Anteil aus. In Abbildung 5 ist der Holzverbrauch für den gesamten deutschen Wohnungsbestand in PJ angegeben. Der durchschnittliche Holzeinsatz im Zeitraum von 2004 bis 2013 lag bei 234 PJ. Die höchsten Verbräuche wurden mit 261 PJ im Jahr 2008, 255 PJ im Jahr 2010 und 251 PJ im Jahr 2013 erreicht (Frondelet al. 2007, Frondelet al. 2011, Frondelet al. 2013, Frondelet al. 2015).



Quellen: Frondelet al. 2007, Frondelet al. 2011, Frondelet al. 2013, Frondelet al. 2015

Abbildung 5: Energetischer Holzeinsatz im Haushaltssektor von RWI/Forsa

Aus Tabelle 6 geht hervor, dass Stückholz mit einem Anteil von durchschnittlich 90 % das bedeutendste Holzsortiment ist. Holzpellets (6 %) sowie Hackschnitzeln und Holz briketts (4 %) machen lediglich einen kleinen Anteil am gesamten Holzeinsatz aus. Im zeitlichen Verlauf geht der Anteil von Stückholz von 94 % im Jahr 2004 auf 87 % im Jahr 2013 zurück. Der Anteil an Holzpellets am gesamten energetischen Holzeinsatz stieg im selben

Zeitraum von 2 % auf 9 %, was den Rückgang der Stückholzanteile erklärt. Der Anteil von Hackschnitzeln und Holzbriketts blieb relativ konstant bei ca. 4 % (Frondel et al. 2007, Frondel et al. 2011, Frondel et al. 2013, Frondel et al. 2015).

Tabelle 6: Energetische Verwendung von Holzsortimenten im Haushaltssektor von RWI/Forsa

Jahr	Stückholz		Holzpellets		Hackschnitzeln, Holzbriketts	
	PJ	%	PJ	%	PJ	%
2004	194,0 ±16,9	93,9	3,7 ±2,7	1,8	8,9 ±5,5	4,3
2005	207,7 ±16,9	91,5	9,8 ±3,9	4,3	9,4 ±6,3	4,1
2006	209,3 ±27,7	96,9	3,2 ±2,7	1,5	3,4 ±1,8	1,6
2007	221,1 ±27,0	93,6	7,4 ±5,5	3,1	7,6 ±3,4	3,2
2008	241,6 ±27,6	92,4	9,7 ±6,9	3,7	10,1 ±4,7	3,9
2009	192,1 ±24,8	87,0	16,7 ±6,0	7,6	12,0 ±3,9	5,4
2010	220,2 ±32,4	86,5	19,6 ±7,1	7,7	14,7 ±5,0	5,8
2011	198,2 ±4,5	87,2	18,9 ±2,6	8,3	10,1 ±2,0	4,4
2012	210,0 ±4,9	87,3	20,2 ±2,7	8,4	10,4 ±2,1	4,3
2013	218,7 ±5,0	87,1	21,5 ±2,9	8,6	10,8 ±2,2	4,3

Quellen: Frondel et al. 2007, Frondel et al. 2011, Frondel et al. 2013, Frondel et al. 2015

3.4 Rheinbraun Brennstoff-Zeitreihe

Im Auftrag der Rheinbraun Brennstoff GmbH erfasste die Gesellschaft für Konsumforschung (GfK) bis ins Jahr 2009 den Bestand an Festbrennstoff-Heizgeräten und den jeweiligen energetischen Holzeinsatz. Auf Grundlage dieser Erhebungen erstellte die AGEB bis ins Jahr 2009 die amtliche Energiebilanz (vgl. Kapitel 3.1.2). Im Folgenden wird diese Zeitreihe als RbB-Zeitreihe bezeichnet.

3.4.1 Methodisches Vorgehen

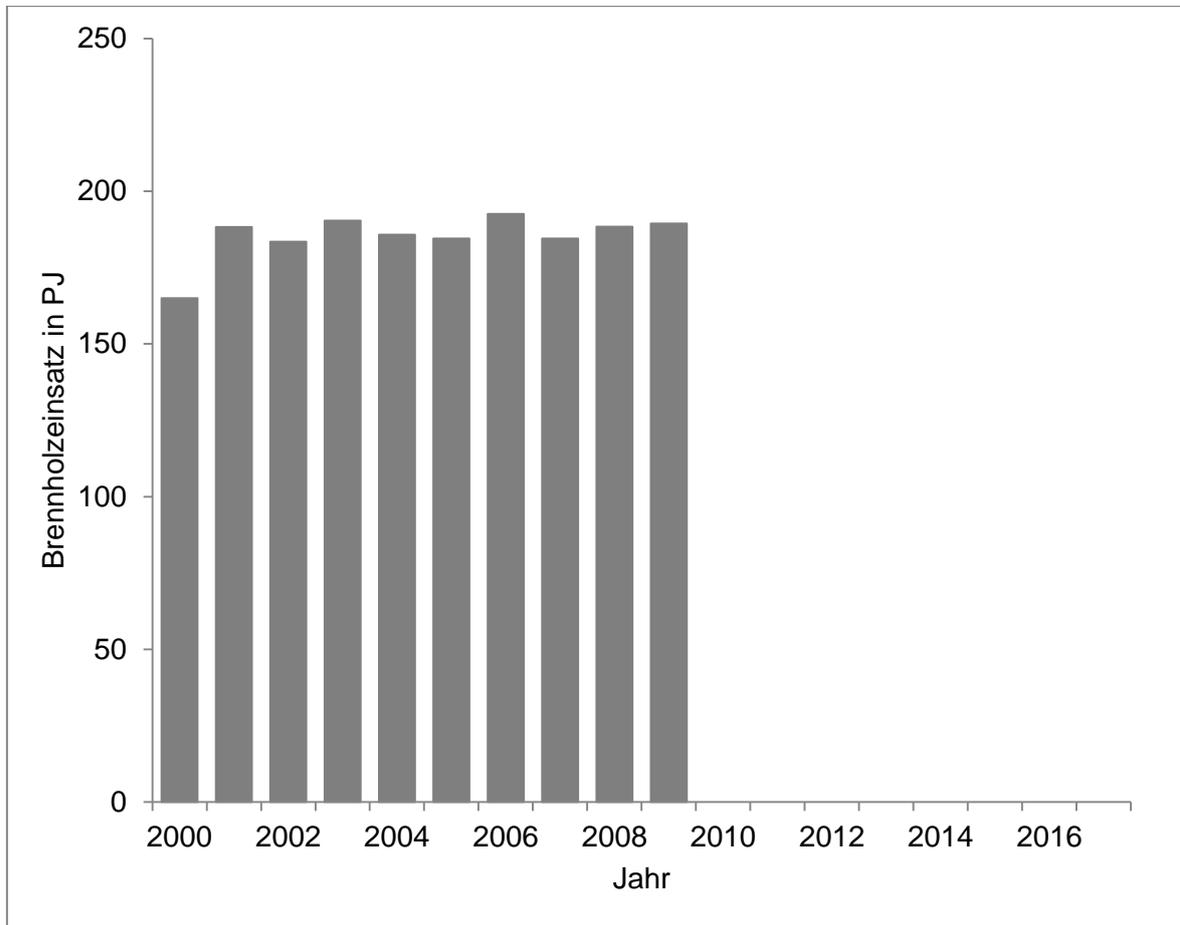
Die Erfassung basiert auf jährlichen Befragungen von 14.000 repräsentativ ausgewählten Haushalten. In den Befragungen gaben Haushalte ihren energetischen Holzeinsatz in der Heizperiode von Oktober des Vorjahres bis April des folgenden Jahres an. Vermutlich ist Holz differenziert nach Stückholz und Holzbriketts erfasst worden. Dies erklärt, warum die AGEB bei der Erstellung der amtlichen Energiebilanz ab dem Jahr 2008 die Angaben um externe Daten zum Einsatz von Holzpellets erweiterte (vgl. Kapitel 3.1.2). Neben den beiden Sortimenten scheinen ebenfalls Informationen zu den Bezugsquellen (z. B. aus dem Wald, Gebrauchtholz) vorzuliegen. Allerdings wurden keine detaillierten Befragungsergebnisse und Informationen zur Hochrechnung veröffentlicht und können aus diesem Grund nicht bewertet werden (Wernicke 2019).

Da die Erhebungen den Holzeinsatz innerhalb einer Heizperiode¹³ abfragten, teilte AGEB den Holzeinsatz der aufeinanderfolgenden Heizperioden nach Monaten auf und fasste die monatlichen Verbräuche anschließend zu jährlichen Verbrauchsangaben zusammen. Die Aufteilung des Holzverbrauchs nach Monaten erfolgte gewichtet nach den monatlichen Heizgradtagen (Wernicke 2019).

¹³ Monate einer Heizperiode: Oktober, November und Dezember des Vorjahres sowie Januar, Februar, März und April des aktuellen Jahres.

3.4.2 Ergebnisse

In Abbildung 6 ist der jährliche Holzeinsatz im Haushaltssektor für die Jahre 2000 bis 2009 abgebildet. Im Jahr 2000 lag der energetische Holzeinsatz im Haushaltssektor bei 165 PJ. In den folgenden Jahren wurde der Brennholzeinsatz relative konstant mit 183 bis 193 PJ angegeben (Wernicke 2019). Informationen zur Sortimentsverteilung sind nicht bekannt.



Quelle: Wernicke 2019

Abbildung 6: Energetische Holzeinsatz im Haushaltssektor nach Rheinbraun Brennstoff GmbH

3.5 Diskussion

Kapitel 3.1 bis 3.4 verdeutlichen, dass der energetische Holzverbrauch im Haushaltssektor in verschiedenen Forschungsarbeiten erfasst wurde und empirische Daten verfügbar sind. Bei einem Vergleich der Ergebnisse kann allerdings nicht erwartet werden, dass die ermittelten Holzverbräuche exakt übereinstimmen. Unterschiede können durch systematische oder zufällige Fehler entstehen (Bortz 2005, Sachs und Hedderich 2006, Kähler 2011). In Kapitel 3.5.1 wird das methodische Vorgehen in den empirischen Studien (Kapitel 3.2 bis 3.4) verglichen. In Kapitel 3.5.2 wird auf die Ergebnisse der amtlichen Energiestatistik (Kapitel 3.1) und der empirischen Studien (Kapitel 3.2 bis 3.4) eingegangen.

Bei der Ergebnisdarstellung in den Kapitel 3.1 bis 3.4 fällt auf, dass der Holzverbrauch in unterschiedlichen Einheiten angegeben wird. Um den Vergleich der Ergebnisse zu ermög-

lichen, werden die Holzmengen in Kapitel 3.5.2 in Energieeinheiten (PJ) angegeben. Für die Umrechnung wurden Faktoren aus Kapitel 2 verwendet.

3.5.1 Methodisches Vorgehen

Für die empirischen Studien (Kapitel 3.2 bis 3.4) zeigt Tabelle 7 die methodischen Merkmale zur Ermittlung des energetischen Holzeinsatzes im Haushaltssektor. Die amtliche Energiestatistik (vgl. Kapitel 3.1) übernimmt Informationen aus den empirischen Studien und wird an dieser Stelle nicht diskutiert. Im Folgenden wird darauf eingegangen, ob die gewählten Methoden von systematischen oder zufälligen Fehler betroffen sein könnten. Da sich systematische Fehler nicht quantifizieren lassen (Sachs und Hedderich 2006), wird im Folgenden lediglich auf mögliche Fehlerrisiken hingewiesen.

Tabelle 7: Methodisches Vorgehen in den empirischen Studien

Methodisches Merkmal	RM-Holz vgl. Kapitel 3.2	RWI/Forsa vgl. Kapitel 3.3	RbB vgl. Kapitel 3.4
Auswahl der Befragten	repräsentativ für ausgewählte Merkmale	zufällig	unbekannt
Datenerfassung	Schriftlich	computerbasiert ^a telefonisch	unbekannt
Hochrechnung	stratifiziert nach Bewohnergruppen	stratifiziert nach Bewohnergruppen	unbekannt
Stichprobengröße	8.773 - 12.709	6.533 - 8.561 ^b	14.000
Zeitpunkt der Erfassung	April 2006 für 2005 April 2008 für 2007 Juli 2011 für 2010 April 2015 für 2014	Mai 2007 für 2004 - 2005 April 2010 für 2006 - 2008 März 2012 für 2008 - 2010 April 2014 für 2013	jährlich für die Heizperiode Oktober - April
Bezugsjahr	2000 2001 ^c 2002 ^c 2003 ^c 2004 ^c 2005 2006 ^c 2007 2008 ^c 2009 ^c 2010 2011 ^c 2012 ^c 2013 ^c 2014 2015 ^c 2016 ^c	2004 2005 2006 2007 2008 2009 2010 2011 ^c 2012 ^c 2013	2000 2001 2002 2003 2004 2005 2006 2007 2008 2009
Fragestellung	6+3 Sortimente in Masse/Volumen	3 Sortimente in Masse/Volumen	unbekannt

Anmerkung: ^a Befragung über Fernseher beim Fehlen eines Internetanschlusses

^b Für ausgewählte Sortimente stammen Informationen teilweise auch aus Telefonbefragungen

^c Modellerte Werte

Systematische Fehler können durch eine mangelnde Repräsentativität der Stichprobe oder fehlerhafte Angaben der Befragten auftreten. Eine repräsentative Stichprobe zeichnet sich dadurch aus, dass die Verteilung aller Merkmale, innerhalb statistischer Grenzen, mit der der Grundgesamtheit übereinstimmt. Dies ist Voraussetzung, um eine Zielgröße (z. B. den energetischen Holzeinsatz) erwartungstreu zu schätzen. Zufallsstichproben erfüllen diese Voraussetzung. In der Praxis besteht bei zufälligen Stichprobenziehungen allerdings die Gefahr, dass Teilnehmer aufgrund fehlender Erreichbarkeit (z. B. kein Internetanschluss) oder durch Antwortverweigerung nicht an der Befragung teilnehmen und die Stichprobe damit verzerren (Bortz 2005, Sachs und Hedderich 2006, Kähler 2011).

RWI/Forsa (vgl. Kapitel 3.3) und RM-Holz (vgl. Kapitel 3.2) berücksichtigten bei der Datenerfassung, dass auch Haushalte ohne Internetanschluss an der Befragung teilnehmen. Um eine verzerrte Darstellung des energetischen Holzverbrauchs durch verweigerter Antworten zu korrigieren, führten RWI/Forsa im Anschluss an eine zufällige Stichprobenziehung eine Gewichtung und eine, nach Bewohnergruppen stratifizierte Hochrechnung durch. In RM-Holz wurde schon während der Stichprobenziehung durch ein quotiertes Auswahlverfahren sichergestellt, dass die Repräsentativität der Stichprobe für einzelne Merkmale erfüllt ist. Außerdem erfolgte die Hochrechnung des Holzverbrauchs stratifiziert nach Bewohnergruppen. Beide Studien verwendeten als Referenzwerte für die Verteilung der Grundgesamtheit die Angaben des Mikrozensus. Der Mikrozensus stellt eine Zufallsstichprobe dar, in der die Merkmalsverteilung des Wohnungsbestands repräsentativ widerspiegelt wird (BMJV 2004). Obwohl nicht auszuschließen ist, dass unberücksichtigte Merkmale bei der Stichprobenziehung verzerrt erfasst wurden, sind die Ergebnisse für ausgewählte Merkmale repräsentativ. Für die Stichprobenbefragungen im Auftrag von RbB (vgl. Kapitel 3.4) ist das Vorgehen bei der Auswahl der Befragten, Datenerfassung und Hochrechnung unbekannt und kann nicht bewertet werden.

Auch fehlerhafte Angaben der Befragten können systematische Fehler zur Folge haben (Sachs und Hedderich 2006). Beispielsweise erfassten Frondel et al. (2011) und Frondel et al. (2013) in einzelnen Stichprobenerhebungen den Holzverbrauch über mehrere Jahre. Es ist davon auszugehen, dass insbesondere weit zurückliegende Holzverbräuche durch Angaben der Vorjahre beeinflusst und damit nicht korrekt angegeben wurden. Eine weitere Möglichkeit für unvollständige Antworten besteht in der unzureichenden Erfassung von Holzsortimenten. In RM-Holz wird eine breite Auswahl an Holzsortimenten in verschiedenen Einheiten berücksichtigt. RWI/Forsa erfassten den Holzeinsatz für deutlich weniger Holzsortimente. Bei RbB ist die Fragestellung zur Bestimmung des energetischen Holzeinsatzes nicht bekannt. Es erscheint sinnvoll Holzsortimente detailliert abzufragen, um sicherzustellen, dass alle Mengenströme berücksichtigt werden. Außerdem helfen differenzierte Informationen zu den Holzsortimenten bei der Datenverarbeitung. Es können spezifische Umrechnungsfaktoren verwendet werden, die die Sortimentseigenschaften (z. B. Holzfeuchte und –dichte) detaillierter abbilden und eine genauere Umrechnung in z. B. Energieeinheiten ermöglichen (vgl. Kapitel 2).

Neben systematischen Fehlern weichen Stichprobenergebnisse durch zufällige Fehler voneinander ab. Der Stichprobenfehler (bzw. Standardfehler) gibt in diesem Zusammenhang an, mit welcher Genauigkeit ein statistischer Kennwert einer Stichprobe (z. B. der Mittelwert des Holzverbrauchs) dem wahren Wert der Grundgesamtheit entspricht. Die

Stichprobengröße und Heterogenität der Angaben zur Zielgröße (z. B. Holzeinsatz) bestimmen den Stichprobenfehler (Bortz 2005, Sachs und Hedderich 2006, Kähler 2011). Die Stichprobengröße liegt bei den betrachteten Studien zwischen 6.533 und 14.000 erfassten Haushalten. Allerdings ist die Anzahl von Haushalten, von denen Verbrauchskennziffern abgeleitet werden können, deutlich kleiner. Je nach Sortiment wurden bei RWI/Forsa 99 bis 1.400 Haushalte mit Holzverbrauch erfasst. Für RM-Holz lassen Angaben aus Döring et al. (2016) für alle Sortimente ähnliche Stichprobengrößen vermuten. Größere Stichproben verkleinern den Stichprobenfehler bei der Schätzung des Holzverbrauchs. Neben einer großen Stichprobe kann die Heterogenität in der Zielgröße durch eine Stratifizierung der Stichprobe verringert werden. RM-Holz und RWI/Forsa stratifizieren die Stichproben vor der Hochrechnung nach Bewohnergruppen, wodurch statistisch genauere Ergebnisse zu erwarten sind (Bortz 2005). Zur Bewertung der statistischen Genauigkeit geben RWI/Forsa Konfidenzintervalle bei einem 5 %igen Signifikanzniveau an. Je nach Sortiment streut der ermittelte Brennholzeinsatz im Haushaltssektor um ± 3 bis ± 19 PJ. In den übrigen Studien sind keine Streumaße angegeben und können, ohne Angaben zur Varianz, nachträglich nicht berechnet werden.

Die empirischen Stichprobenergebnisse werden verwendet, um Zeitreihen zu bilden. Für die Jahre in denen keine empirischen Ergebnisse vorliegen, werden Verbrauchswerte durch statistische Modelle geschätzt (vgl. Kapitel 3.2 und 3.3). In Abhängigkeit der verwendeten Modellannahmen können sich die Schätzergebnisse zum Teil deutlich voneinander unterscheiden.

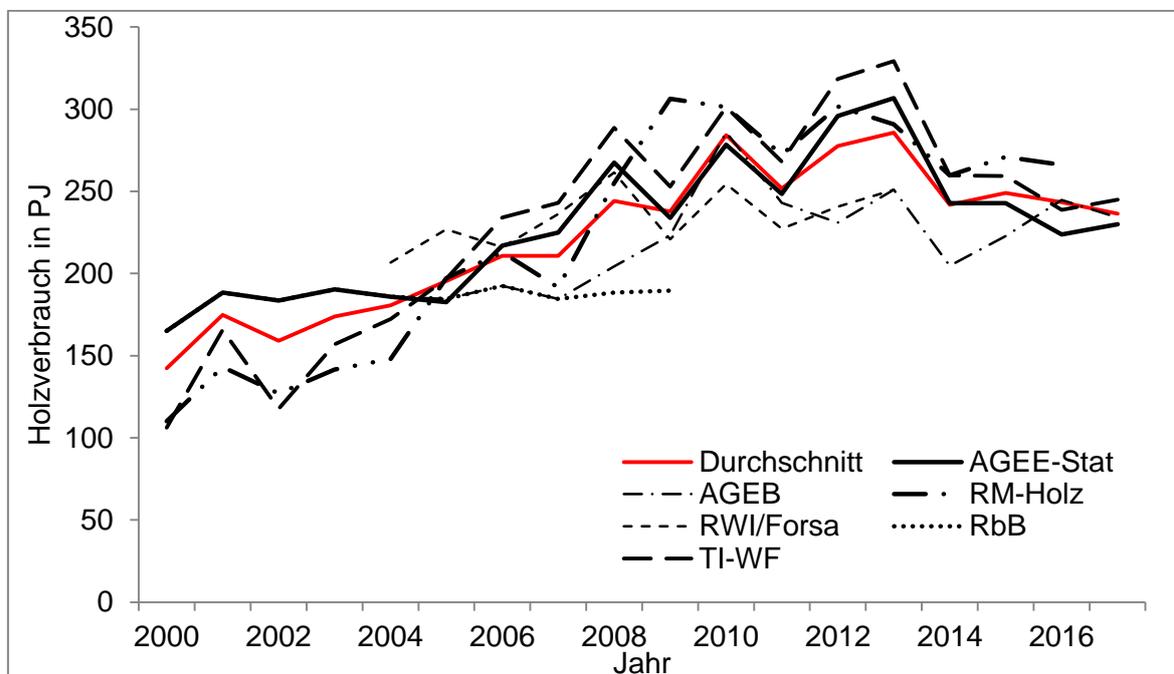
3.5.2 Ergebnisse

Im Jahr 2014 betrieben 6,2 Mio. Haushalte Einzelraumfeuerungsanlagen (17 % des Wohnungsbestands) und 1,0 Mio. Haushalte Holzzentralheizungen (3 % des Wohnungsbestands) (Döring et al. 2016). ZIV (2015) ermittelte für das Jahr 2015 einen Bestand an Einzelraumfeuerungsanlagen von 11 Mio. Anlagen. Der höhere Bestand lässt sich dadurch erklären, dass Haushalte zum Teil mehrere Einzelraumfeuerungsanlagen unterhalten und einige Anlagen nicht dem Haushaltssektor, sondern z. B. dem Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen, zuzuordnen sind (Struschka et al. 2008, Tebert et al. 2016, Glasenapp und Weimar 2019). Im Mikrozensus (2016) wird der Bestand an Wohnungen, die Holz als zusätzlichen Energieträger verwenden, mit 4,5 Mio. und Wohnungen mit Holz-Sammelheizungen mit 0,9 Mio. Anlagen angegeben.

Abbildung 7 zeigt Angaben zum energetischen Holzeinsatz im deutschen Haushaltssektor in PJ aus den Kapiteln 3.1 bis 3.4. Bei Bedarf wurden für die Umrechnung Faktoren aus Kapitel 2 verwendet. Der durchschnittliche und nach Holzsortimenten gewichtete Umrechnungsfaktor des Gesamtverbrauchs lag bei 9,42 PJ/Mio. m³. Als Referenz ist eine Zeitreihe zum energetischen Holzeinsatz in Rot angegeben, die den durchschnittlichen Verbrauch aller Studien repräsentiert.

Im Zeitraum von 2000 bis 2010 stieg der Holzeinsatz im Haushaltssektor von 142 auf 284 PJ (15 auf 30 Mio. m³). Dieser Anstieg ist auf die Zunahme von Holzfeuerungsanlagen und steigende Preise für fossile Energieträger zurückzuführen (Destatis 2017, BDEW 2019, Mikrozensus 2008, Mikrozensus 2012, Mikrozensus 2016, Mantau 2019, DEPI 2019, Glasenapp et al. 2019b). Nach einem klimatisch bedingten Rückgang auf 252 PJ (27 Mio. m³) im Jahr 2011 (DWD 2017, Mantau 2019, Glasenapp et al. 2019b),

stieg der Verbrauch in den folgenden beiden Jahren wieder auf bis zu 286 PJ (30 Mio. m³). Ab dem Jahr 2014 ist zu erkennen, dass der energetische Holzeinsatz zwischen 236 und 249 PJ (25 und 26 Mio. m³) lag, was durch das relativ milde Klima und Effizienzsteigerungen im Anlagenbestand zu erklären ist (DWD 2017, Mantau 2019, Glasenapp et al. 2019b).



Quellen: Mantau 2004, Mantau und Sörgel 2006, Frondel et al. 2007, Hick und Mantau 2008, Frondel et al. 2011, Mantau 2012, Frondel et al. 2013, Frondel et al. 2015, Döring et al. 2016, BMWi 2018a, AGEB 2019, Mantau 2019, TI-WF 2019, Wernicke 2019

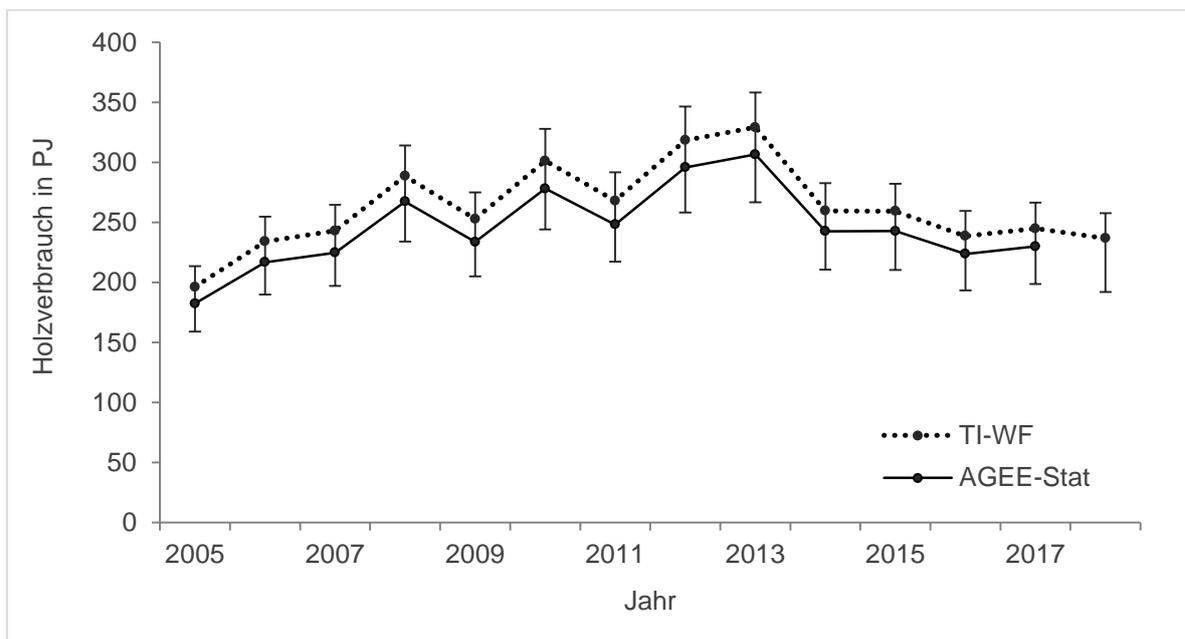
Abbildung 7: Energetischer Holzeinsatz im deutschen Haushaltssektor

Beim Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Literaturquellen fallen zum Teil deutliche Unterschiede auf. Beispielsweise unterscheiden sich Angaben in der RbB-Zeitreihe (vgl. Kapitel 3.4) im Zeitraum von 2000 bis 2004 deutlich von denen in der RM-Holz- und TI-WF-Zeitreihe (vgl. Kapitel 3.2). Aufgrund der fehlenden Angaben zur Berechnung der RbB-Zeitreihe ist eine Bewertung der Ergebnisse schwierig. Allerdings scheint der konstante Verlauf auch über das Jahr 2004 hinaus, unter Berücksichtigung der zunehmenden Investitionsanreize für Holzfeuerungsanlagen und steigender Preise für fossile Energieträger, fraglich (Destatis 2017, BMF 2019). Auch mit den Ergebnissen aus RM-Holz, TI-WF und RWI/Forsa (vgl. Kapitel 3.3) sind die Angaben aus der RbB-Zeitreihe ab dem Jahr 2004 nicht vereinbar.

Unterschiede zwischen RM-Holz, TI-WF und RWI/Forsa können teilweise auf statistische Unsicherheiten zurückgeführt werden. In den Jahren 2006, 2008 und 2010 sind die Unterschiede im Holzeinsatz aufgrund der Streuung in RWI/Forsa als nicht signifikant zu bewerten. Für die übrigen Jahre trifft diese Aussage nicht zu. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass die Ergebnisse aus dem RM-Holz und TI-WF auch einer Streuung unterliegen. Wären die Streumaße bekannt, könnten sich Unterschiede auch für weitere Jahre als nicht signifikant erweisen.

Die Zeitreihen von AGEE-Stat (vgl. Kapitel 3.1) und TI-WF weisen ab dem Jahr 2005 konstante Unterschiede auf, obwohl die Ausgangsdaten für beide Studien identisch sind.

Es ist davon auszugehen, dass unterschiedliche Annahmen zur Berechnung der Umrechnungsfaktoren für die Unterschiede verantwortlich sind (vgl. Kapitel 2). Abbildung 8 zeigt die Zeitreihen von AGEE-Stat und TI-WF in PJ. Außerdem sind für die TI-WF-Zeitreihe Streumaße angegeben, die sich einstellen, wenn an Stelle eines nach Holzsortimenten gewichteten Faktors jeweils der kleinste bzw. größte Umrechnungsfaktor aller Sortimente verwendet wird. Die Ergebnisse legen nahe, dass Änderungen in den Annahmen der Sortimentseigenschaften (z. B. in der Holzfeuchte) ähnliche Verbrauchswerte für die TI-WF- und AGEE-Stat-Zeitreihe ergeben könnten. Vor dem Hintergrund dieser Unterschiede sollten zukünftig auch empirische Informationen zur Holzfeuchte von Holzsortimenten erfasst werden, um die Berechnung der Umrechnungsfaktoren auf eine solide Datenbasis zu stützen.



Quelle: TI-WF 2019

Abbildung 8: Energetische Holzverwendung im Haushaltssektor und Unsicherheiten in der Umrechnung

Weitere Unterschiede in den Zeitreihen können durch Modellannahmen entstehen. Wie bereits in Kapitel 3.2 erwähnt, werden die RM-Holz- und TI-WF-Zeitreihen durch Modelle geschätzt. Die Berücksichtigung von Subventionen des Marktanreizprogramms bei der RM-Holz-Zeitreihenbildung erklärt Unterschiede in den beiden Zeitreihen. In Kapitel 5 wird hierauf näher eingegangen, indem Einflussfaktoren auf den Brennholzeinsatz in einem durchschnittlichen Haushalt analysiert werden.

Neben dem gesamten Holzeinsatz erfassten RM-Holz (Mantau 2004, Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016) und RWI/Forsa (Frondele et al. 2007, Frondele et al. 2011, Frondele et al. 2013, Frondele et al. 2015) den energetischen Einsatz von Holzsortimenten. Mit bis zu neun Holzsortimenten gibt RM-Holz den sortimentsbezogenen Holzeinsatz deutlich differenzierter an als RWI/Forsa mit drei Sortimenten. In Tabelle 8 sind die von Döring et al. (2016) aktualisierten Ergebnisse des RM-Holz im zeitlichen Verlauf dargestellt. Die Ergebnisse wurden mit Hilfe der Umrechnungsfaktoren aus Kapitel 2 in PJ umgerechnet. Außerdem wurden die Sortimente Scheitholz aus dem Wald und Garten

sowie Landschaftspflegeholz, Gebrauchtholz, Schnittholzreste und sonstiges Holz zu Scheitholz zusammengefasst, um die Vergleichbarkeit zu den RWI/Forsa-Angaben herzustellen.

Tabelle 8: Verteilung der energetisch verwendeten Holzsortimente aus den Ergebnissen des Rohstoffmonitoring Holz in PJ

Jahr	Scheitholz		Holzpellets		Hackschnitzeln, Holzbriketts	
	PJ	%	PJ	%	PJ	%
2000	108,6	98,0	0,4	0,3	1,9	1,7
2001						
2002						
2003						
2004						
2005	192,2	97,4	1,6	0,8	3,5	1,8
2006						
2007	233,4	95,9	4,3	1,8	5,8	2,4
2008						
2009						
2010	278,6	92,7	13,7	4,5	8,4	2,8
2011						
2012						
2013						
2014	231,5	89,5	19,2	7,4	8,0	3,1

Quellen: Mantau 2004, Mantau und Sörgel 2006, Hick und Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016

Tabelle 9 zeigt den energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor aus RWI/Forsa, nach den Sortimenten Stückholz, Holzpellets sowie Hackschnitzeln und Holzbriketts.

Tabelle 9: Verteilung der energetisch verwendeten Holzsortimente aus den Ergebnissen von RWI/Forsa in PJ

Jahr	Stückholz		Holzpellets		Hackschnitzeln, Holzbriketts	
	PJ	%	PJ	%	PJ	%
2000						
2001						
2002						
2003						
2004	194,0 ±16,9	93,9	3,7 ±2,7	1,8	8,9 ±5,5	4,3
2005	207,7 ±16,9	91,5	9,8 ±3,9	4,3	9,4 ±6,3	4,1
2006	209,3 ±27,7	96,9	3,2 ±2,7	1,5	3,4 ±1,8	1,6
2007	221,1 ±27,0	93,6	7,4 ±5,5	3,1	7,6 ±3,4	3,2
2008	241,6 ±27,6	92,4	9,7 ±6,9	3,7	10,1 ±4,7	3,9
2009	192,1 ±24,8	87,0	16,7 ±6,0	7,6	12,0 ±3,9	5,4
2010	220,2 ±32,4	86,5	19,6 ±7,1	7,7	14,7 ±5,0	5,8
2011	198,2 ±4,5	87,2	18,9 ±2,6	8,3	10,1 ±2,0	4,4
2012	210,0 ±4,9	87,3	20,2 ±2,7	8,4	10,4 ±2,1	4,3
2013	218,7 ±5,0	87,1	21,5 ±2,9	8,6	10,8 ±2,2	4,3
2014						

Quellen: Frondel et al. 2007, Frondel et al. 2011, Frondel et al. 2013, Frondel et al. 2015

Scheitholz war mit 87 bis 98 % das wichtigste Sortiment. Die Abweichungen in den absoluten Verbräuchen des RM-Holz (Tabelle 8) und RWI/Forsa (Tabelle 9) sind gering. Es ist davon auszugehen, dass, wenn Streumaße für die Ergebnisse des RM-Holz bekannt wären, keine signifikanten Abweichungen zu RWI/Forsa bestünden. Im zeitlichen Verlauf nehmen die Scheitholzanteile am gesamten Brennholzeinsatz, trotz ansteigender absoluter Verbräuche, sowohl in RM-Holz als auch in RWI/Forsa ab. Der Grund für diesen Rückgang liegt im schnelleren Anstieg des Verbrauchs an Holzpellets.

Der Verbrauch von Holzpellets stieg von wenigen hundert TJ im Jahr 2000 auf 19 PJ im Jahr 2014. Im selben Zeitraum stiegen die Anteile an Holzpellets am gesamten energetischen Holzeinsatz von 0,3 auf 7,4 %. Beim Vergleich der absoluten Verbrauchswerte sind in den Angaben von RM-Holz und RWI/Forsa bis auf das Jahr 2005 keine signifikanten Unterschiede festzustellen. Für das Jahr 2005 weisen RWI/Forsa einen signifikant höheren absoluten Verbrauch aus als RM-Holz. Der Wert von RWI/Forsa scheint fehlerbehaftet zu sein, da er einen rückläufigen Trend im Verbrauch von Holzpellets in den Jahren 2005 bis 2006 suggeriert. Diese Entwicklung passt nicht in die allgemeine Entwicklung des Holzpelletverbrauchs aus RWI/Forsa. Außerdem stünde eine derartige Entwicklung im Widerspruch zu den Ergebnissen aus RM-Holz sowie Angaben von DEPV (2019) für den gesamten Holzpelletverbrauch, der ab dem Jahr 2005 kontinuierlich anstieg.

Der Verbrauch von Hackschnitzeln und Holzbriketts wird im RM-Holz tendenziell niedriger angegeben als bei RWI/Forsa. Ähnlich wie beim Scheitholz ist auch bei Hackschnitzeln

und Holzbriketts davon auszugehen, dass, wenn Streumaße für die Ergebnisse des RM-Holz bekannt wären, keine signifikanten Abweichungen zu RWI/Forsa bestünden. Außerdem können Unterschiede durch Ungenauigkeiten bei der Zusammenfassung von Holzsortimenten erklärt werden, die für eine bessere Vergleichbarkeit beider Ergebnisse notwendig war. Ein Teil der Schnittholzreste könnte beispielsweise als Hackschnitzel vorliegen und wäre bei RWI/Forsa nicht als Scheit- bzw. Stückholz erfasst worden.

4 Bedeutung von Holzenergie für den Holzmarkt und Energiesektor

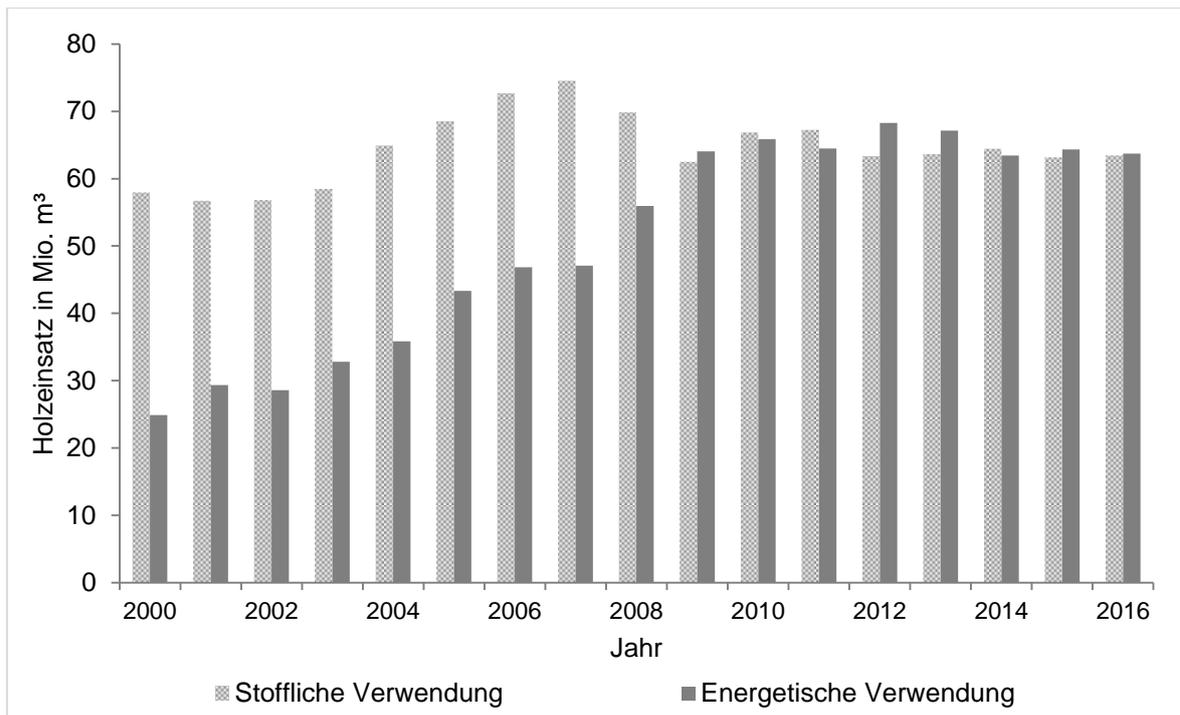
Im Folgenden wird die Bedeutung der energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor für die Forst- und Holzwirtschaft sowie den Energiesektor untersucht. In Kapitel 4.1 wird neben der Bedeutung der energetischen Holznutzung im Holzmarkt auf die Struktur der verwendeten Holzsortimente eingegangen, da hierdurch potenzielle Konkurrenzbeziehungen bewertet werden können. Außerdem wird die Nachhaltigkeit der Holznutzung untersucht.

Kapitel 4.2 befasst sich mit der energetischen Holzverwendung im Kontext des Energiesektors. Es wird die Bilanzierung des Energiesektors, die Struktur des Endenergieverbrauchs und die Bedeutung von erneuerbaren Energieträgern für den Endenergieverbrauch im Haushaltssektor beschrieben. In Kapitel 4.3 werden die Ergebnisse zusammengefasst und im Kontext der zukünftigen Förderung von erneuerbaren Energien diskutiert.

4.1 Bedeutung in der Forst- und Holzwirtschaft

Der Holzmarkt wird, in der von Mantau (2012) entwickelten Holzrohstoffbilanz, in stoffliche und energetische Holzverwender eingeteilt. Zu den stofflichen Holzverwendern zählen Sägewerke, Holzwerkstoffproduzenten, Zellstoffproduzenten sowie sonstige stoffliche Verwender. Als energetische Holzverwender werden neben dem Haushaltssektor auch Biomasseanlagen bis 1 MW Feuerungswärmeleistung (FWL), Biomasseanlagen ab 1 MW FWL und sonstige Energieholznutzer berücksichtigt. Außerdem werden Produzenten von lagerfähigen Energieholzprodukten (z. B. Holzpellets) ausgewiesen.

Mantau (2019) konnte zeigen, dass die gesamte energetische Holzverwendung seit der Jahrtausendwende deutlich zunahm. Wie Abbildung 9 zu entnehmen ist, stieg der energetische Holzeinsatz von 25 Mio. m³ im Jahr 2000 auf 66 Mio. m³ im Jahr 2010. Ab dem Jahr 2011 verblieb der energetische Holzeinsatz zwischen 63 bis 68 Mio. m³. Es ist davon auszugehen, dass die Zunahme der energetischen Holzverwendung im Zeitraum von 2000 bis 2010 vor allem auf die gezielte Förderung von erneuerbaren Energien zurückzuführen ist. Während die im Erneuerbaren Energien Gesetz (EEG) geregelte Einspeisevergütung für die Stromerzeugung aus erneuerbaren Energien vornehmlich die Holzverbrennung in stromerzeugenden Biomasseanlagen fördert, profitiert der Wärmesektor von Investitionsförderung durch das Marktanzreizprogramm (MAP). Dass der energetische Holzeinsatz ab dem Jahr 2010 gleichbleibend ist, lässt sich durch den Rückgang der Preise für fossile Energieträger, Einschränkungen in der EEG-Förderung für Biomasseanlagen sowie mildere Wintermonate erklären (Mantau 2019, BMF 2019, BMWi 2018b, Scheffelowitz und Thrän 2016, Destatis 2017).

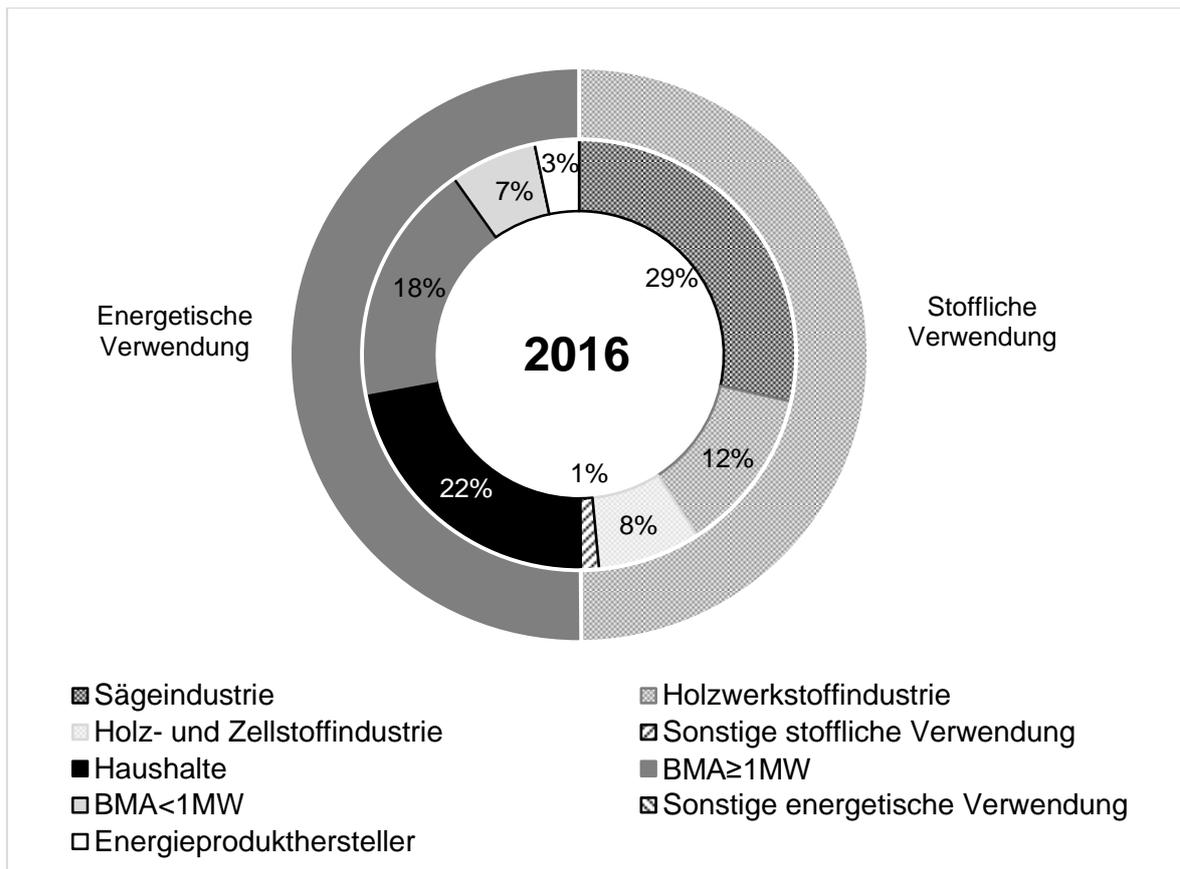


Quelle: Mantau 2019

Abbildung 9: Stoffliche und energetische Holzverwendung in Mio. m³

Die stoffliche Holzverwendung war bis ins Jahr 2007 traditionell höher als die energetische Holznutzung und verzeichnete im Zeitraum von 2000 bis 2007 einen Anstieg von 58 auf 75 Mio. m³. Während der Finanzkrise fiel die stoffliche Holzverwendung innerhalb von drei Jahren um 12 Mio. m³ und lag im Jahr 2009 mit 62 Mio. m³ unter der, im selben Zeitraum weiter gestiegenen, energetischen Holzverwendung (64 Mio. m³) (Mantau 2019). Die geringen Auswirkungen der Finanzkrise auf die energetische Holzverwendung lassen sich dadurch erklären, dass EEG-geförderte Anlagen durch die Absatzgarantie ihres erzeugten Stroms vom Marktgeschehen wenig beeinflusst werden (Scheftelowitz und Thrän 2016). Darüber hinaus weisen Glasenapp und McCusker (2018) darauf hin, dass Holzenergie als Wärmelieferant in Krisenzeiten eine stärkere Nachfrage erfährt.

In Abbildung 10 sind die Anteile der Holzverwender am gesamten Holzeinsatz im Jahr 2016 dargestellt. Die EnergieproduktHersteller werden dabei der energetischen Verwendung zugerechnet. Insgesamt wurden im Jahr 2016 127 Mio. m³ Holzrohstoffe in Deutschland verwendet. Mit 64 Mio. m³ war die energetische Holzverwendung gleichauf mit der stofflichen Verwendung (63 Mio. m³). Die Sägeindustrie und der Haushaltssektor hatten mit 36 und 28 Mio. m³ die größten Anteile am gesamten Holzeinsatz. Biomasseanlagen ab 1 MW FWL verbrauchten 23 Mio. m³ und die Holzwerkstoffindustrie 16 Mio. m³ Holz. Die Holz- und Zellstoffindustrie sowie Biomasseanlagen bis 1 MW FWL hatten mit jeweils 10 und 8 Mio. m³ lediglich eine geringe Bedeutung für die gesamte Holzverwendung. Demnach ist der Haushaltssektor nach der Sägeindustrie der zweitgrößte Holzverwender in Deutschland, was die bedeutende Rolle im gesamten deutschen Holzmarkt unterstreicht (Mantau 2019).



Quelle: Mantau 2019

Abbildung 10: Holzeinsatz nach den Sektoren der Holzwirtschaft im Jahr 2016

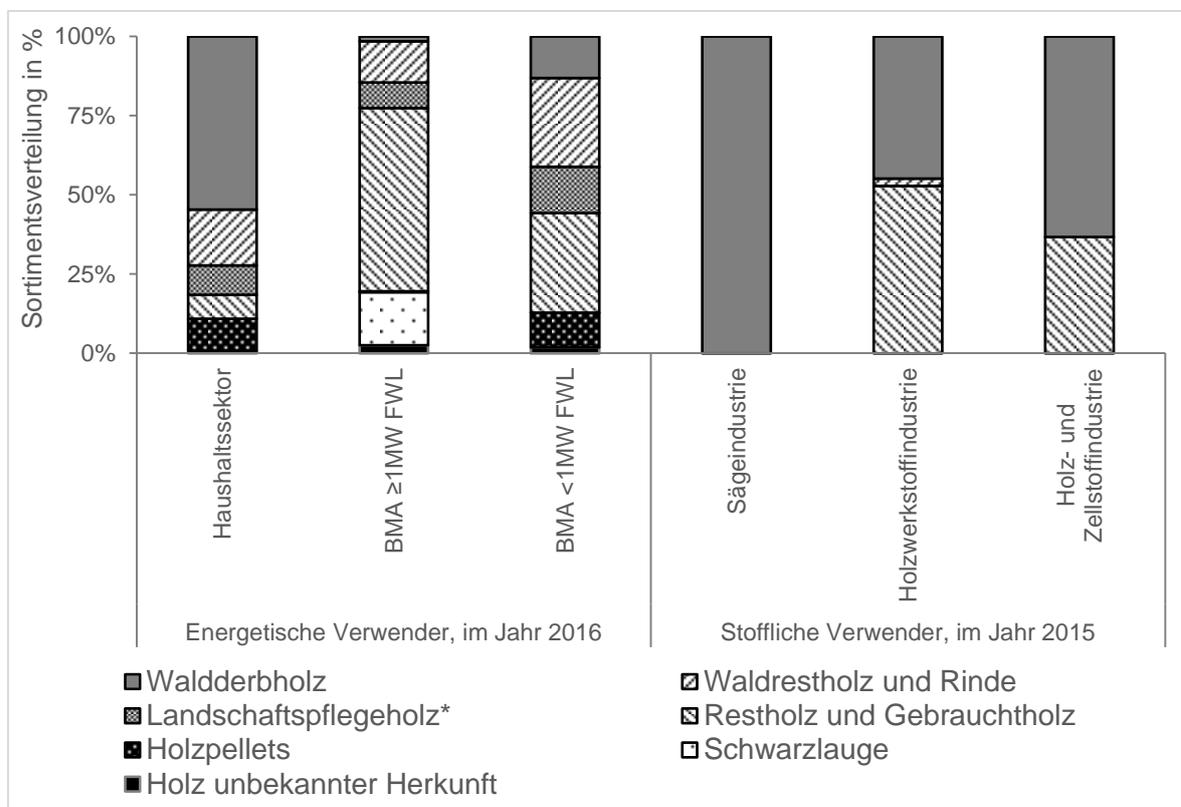
Um Rohstoffkonkurrenzen zu vermeiden, nutzen die Teilnehmer des Holzmarkts unterschiedliche Holzsortimente. Abbildung 11 zeigt, dass stoffliche Holzverwender ihren Holzbedarf überwiegend mit Waldderbholz decken. Insbesondere die Sägeindustrie kann ausschließlich sägefähiges Waldderbholz verwenden und hat somit die höchsten Qualitätsanforderungen an den Rohstoff. Innerhalb technologischer Grenzen können die Holzwerkstoffindustrie sowie Holz- und Zellstoffindustrie andere Holzsortimente, wie z. B. Sägenebenprodukte, industrielles Rest- und Gebrauchtholz, verwenden (Mantau 2019).

Die heterogenere Sortimentsverteilung der energetischen Holzverwender ist ein Indiz dafür, dass sie der Rohstoffkonkurrenz mit den stofflichen Verwendern ausweichen. Biomasseanlagen ab 1 MW FWL verwenden nahezu kein Holz aus dem Wald. Der Bedarf wird überwiegend durch Gebrauchtholz gedeckt. Biomasseanlagen bis 1 MW FWL verwenden dagegen einen höheren Anteil an Waldholz als Biomasseanlagen ab 1 MW FWL. Allerdings handelt es sich hierbei überwiegend um Waldrestholz und Rinde (Mantau 2019).

Beim Haushaltssektor fällt auf, dass sich die Sortimentsstruktur von der der übrigen energetischen Verwender unterscheidet. Während fast der gesamte energetische Waldderbholzbedarf (17 Mio. m³) im Jahr 2016 auf den Haushaltssektor (15 Mio. m³) entfiel, ist der Einsatz von Gebrauchtholz im Haushaltssektor gering (Mantau 2019). Es ist davon auszugehen, dass durch die verwendeten Sortimente Konkurrenz zur Holzwerkstoffindustrie oder Holz- und Zellstoffindustrie besteht. Die Konkurrenzfähigkeit von Haushalten lässt sich dadurch erklären, dass der Haushaltssektor aus einer Vielzahl an Kleinverbrau-

chern besteht, die bereit sind für kleine Brennholzmengen verhältnismäßig hohe Preise zu zahlen. Mantau (2013) konnte zeigen, dass die Hälfte der Brennholznutzer ihr Holz über den Brennstoffhandel zu Preisen über dem durchschnittlichen Marktpreis erwarb. Obwohl Haushalte einen niedrigen spezifischen Verbrauch aufweisen, stellt die Summe des Holzverbrauchs aller Haushalte eine relevante Größe für die Holznutzung dar.

Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass bei der energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor vor allem Laubholz (Waldscheitholz: 62 % Laubholz im Jahr 2014) eingesetzt wird, während die stofflichen Verwender überwiegend Nadelholz einsetzen. Beispielsweise entfielen im Jahr 2015 87 % des in der Holz- und Zellstoffindustrie verwendeten Industrielozes auf Nadelholz. Im selben Jahr war zwei Drittel des, in der Holzwerkstoffindustrie eingesetzten Industrielozes, Nadelholz (Mantau 2019). Der Konkurrenzdruck zwischen der energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor und der Holz- und Zellstoff- sowie Holzwerkstoffindustrie wird hierdurch abgemildert.



Quellen: Döring et al. 2016, Döring et al. 2017a, Döring et al. 2017b, Döring et al. 2017c, Döring et al. 2018a, Döring et al. 2018b

Abbildung 11: Sortimentsverteilung nach Verwendungssektoren im Jahr 2015 bzw. 2016

Neben den Rohstoffkonkurrenzen von Marktteilnehmern beeinflussen die Art der Waldbewirtschaftung und die Effektivität in der Wiederverwertung von Reststoffen das Holzangebot. Für den Holzmarkt hat insbesondere das Holz aus dem Wald eine wichtige Bedeutung. Der Wald beliefert den Holzmarkt mit Frischfasern aus denen sowohl Endprodukte (z. B. Schnittholz, Holzwerkstoffplatten) als auch Reststoffe entstehen, die im Holzmarkt über verschiedene Nutzungskaskaden weiterverarbeitet werden. Im Jahr 2016 machten Waldderholz, Waldrestholz und Rinde den überwiegenden Anteil (61 %) des genutzten Holzes aus (Mantau 2015, Mantau 2019). Die Art der Waldbewirtschaftung, die durch ökologische, technische und soziale Rahmenbedingungen bestimmt wird,

beeinflusst die Verfügbarkeit von Frischfasern und definiert damit ein theoretisch nutzbares Waldholzpotenzial. Dem theoretischen Waldholzpotenzial steht die tatsächlich genutzte Waldholzmenge der Teilnehmer des Holzmarkts gegenüber (Mantau et al. 2010, Verkerk et al. 2010, Oehmichen et al. 2017).

Aus Tabelle 10 geht hervor, dass in Deutschland im Jahr 2016 67 Mio. m³ Waldderbholz und 12 Mio. m³ Waldrestholz (inkl. Rinde) genutzt wurde (Mantau 2019). Mantau (2010) gab für das Jahr 2016 ein theoretisches Waldderbholzpotenzial von 77 Mio. m³ und für Waldrestholz (inkl. Rinde) ein Potenzial von 24 Mio. m³ an. Außerdem ermittelte Mantau (2019) auf Grundlage von Mantau et al. (2016) und Oehmichen et al. (2017) für verschiedene Szenarien theoretische Waldderbholzpotenziale von 75 bis 100 Mio. m³ sowie Potenziale von 6 bis 28 Mio. m³ für Waldrestholz. Die Szenarien unterscheiden sich durch unterschiedliche Annahmen zu den Nutzungspräferenzen. Beispielsweise wird in einem Szenario mit einer Präferenz für den Naturschutz ein geringeres Holzpotenzial ausgewiesen als in einem Szenario, das die Holznutzung bevorzugt. Der Vergleich von theoretisch nutzbaren Potenzialen und der tatsächlichen Verwendung von Waldholz legt nahe, dass ungenutzte Potenziale insbesondere bei einem Szenario mit einer Präferenz für die Holznutzung vorhanden sind.

Tabelle 10: Theoretische und genutzte Potenziale von Holz aus primären Quellen in Mio. m³ im Jahr 2016

Holzsortimente	Genutztes Potenzial	Theoretisches Potenzial
Waldderbholz	67	75 ^b ...77 ^a ...100 ^c
Waldrestholz (inkl. Rinde)	12	6 ^b ...24 ^a ...28 ^c
Waldholz	78	81^b..101^a..129^c

Anmerkung: a. Linear interpoliert zwischen den Jahren 2010 und 2020 aus EUwood

b. Szenario mit Präferenz für den Naturschutz aus WEHAM

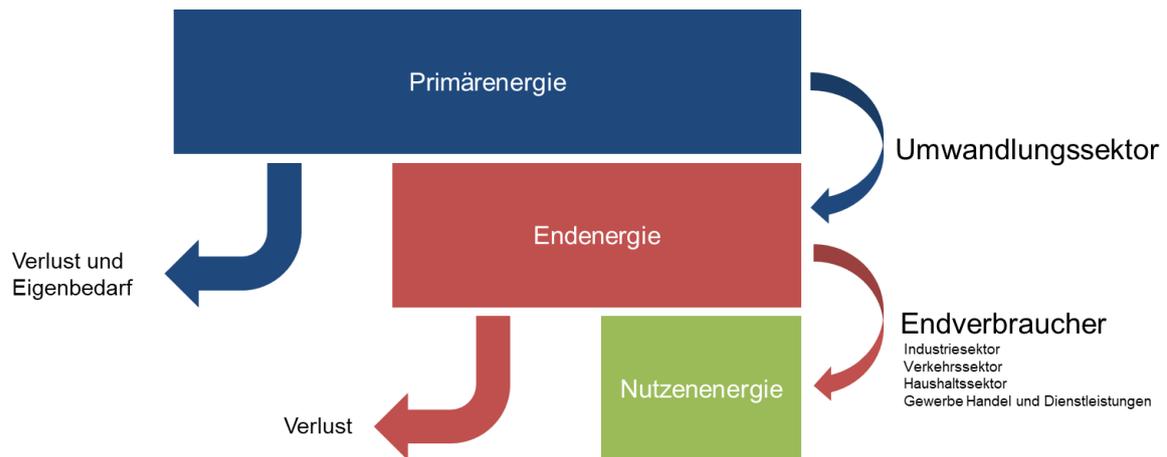
c. Szenario mit Präferenz auf der Holznutzung aus WEHAM

Quellen: Mantau 2010, Verkerk et al. 2010, Mantau et al. 2016, Oehmichen et al. 2017, Mantau 2019

Holzrohstoffe werden auch bei der industriellen Verarbeitung von Holz (z. B. Sägenebenprodukte und industrielles Restholz) oder als Gebrauchtholz, am Ende des Lebenszyklus eines Holzprodukts (z. B. Möbel, Verpackungen), bereitgestellt. In Anbetracht der geringen Verwendung sind diese Sortimente für den Haushaltssektor weniger relevant. Dies liegt unter anderem daran, dass die energetische Verwendung von industriellem Rest- oder Gebrauchtholz teilweise, aufgrund von gesetzlichen Vorschriften, nicht zulässig ist (BMJV 2019, Leek 2010, Saal 2010). Sägenebenprodukte, die zu Energieholzprodukten weiterverarbeitet werden, finden allerdings durchaus Verwendung im Haushaltssektor und werden darüber hinaus international gehandelt (Steierer 2010, Bioenergy Europe 2019, Mantau 2019).

4.2 Bedeutung im Energiesektor

Die Erfassung der Entstehung, Verteilung und Verwendung von Energiemengen erfolgt für den Energiesektor in Bilanzen, nach dem Schema einer Input-Output-Tabelle. Es wird zwischen der Primärenergiebilanz, Umwandlungsbilanz und dem Endenergieverbrauch unterschieden (Ströbele et al. 2012). In Abbildung 12 ist die hierarchische Anordnung der Bilanzen dargestellt.



Quelle: Ströbele et al. 2012

Abbildung 12: Organigramm des Energiesektors

Die Primärenergiebilanz für Deutschland erfasst das inländische Angebot an natürlich vorkommenden Energieträgern. Neben der heimischen Produktion wird der Handel und Lagerbestandsänderungen von Primärenergieträgern (z. B. Rohöl) sowie Sekundärenergieträgern (z. B. raffinierte Energieträger) berücksichtigt (Ströbele et al. 2012). Im Jahr 2016 bezog Deutschland den Großteil der, für den Inlandsverbrauch und Exporte zur Verfügung stehenden, Primärenergieträger aus Importen (75 %). Lediglich 25 % der Primärenergieträger stammte aus der heimischen Produktion. Erneuerbare Energieträger machten 43 % der heimischen Produktion aus (AGEB 2018).

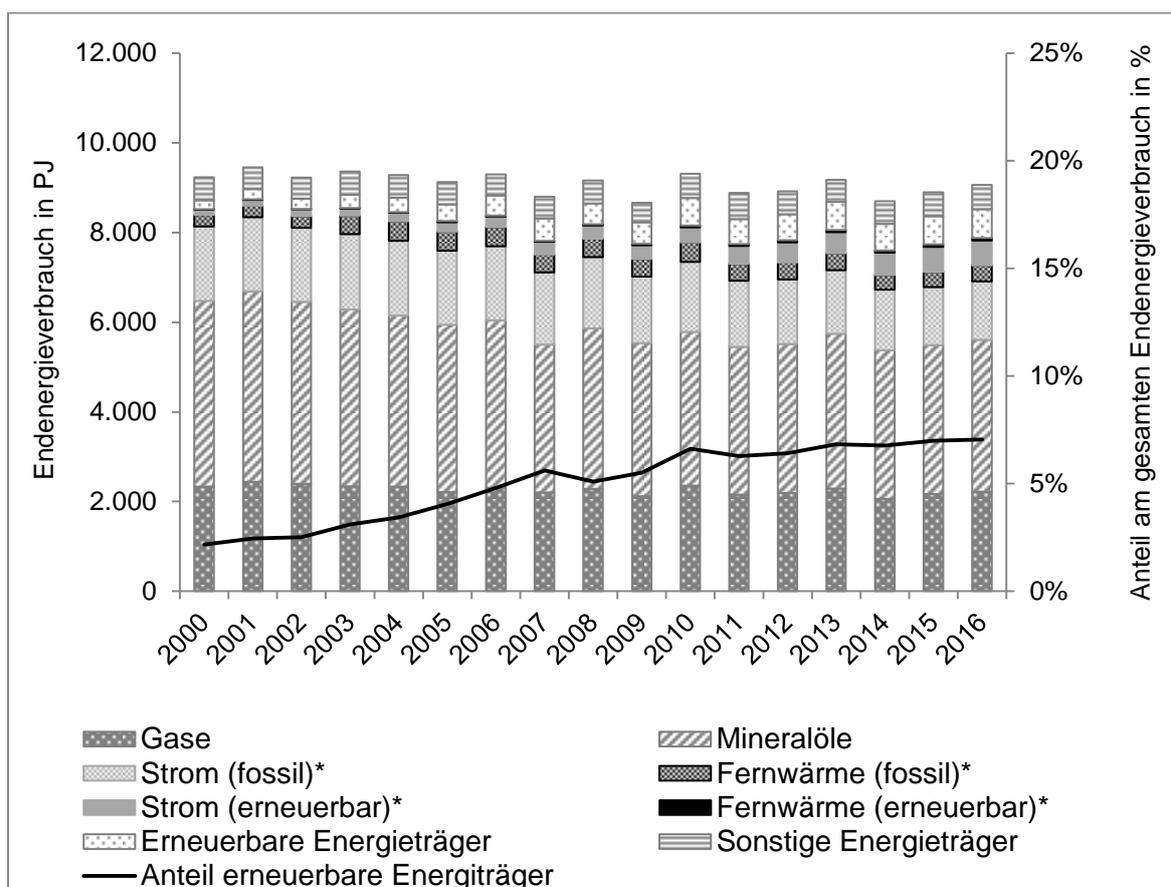
Primär- und Sekundärenergieträger werden in Umwandlungsprozessen zu Energieträgern für den Endverbrauch umgewandelt und in der Umwandlungsbilanz abgebildet. Dies betrifft insbesondere die Strom- und Wärmeherzeugung in Kraftwerken (z. B. Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung) oder die Raffinierung von Rohöl zu Mineralölen. Energie, die während der Umwandlung, z. B. durch Eigenbedarf oder Fackel- und Leitungsverlusten, aus dem System entnommen wird und Endverbrauchern daher nicht zur Verfügung steht, wird als Verlust ausgewiesen (Ströbele et al. 2012).

Die Endenergiebilanz umfasst den Energieeinsatz der volkswirtschaftlichen Sektoren zur Erzeugung von Nutzenergie (z. B. Wärme-, Licht- oder Bewegungsenergie). In der deutschen Energiebilanz werden Endverbraucher in die Hauptkategorien Industrie-, Verkehrs- und Haushaltssektor sowie den Sektor Gewerbe, Handel und Dienstleistungen eingeteilt. Für Sektoren wie den Industriesektor liegen außerdem detaillierte Informationen über den Energieeinsatz in verschiedenen Wirtschaftszweigen vor (Ströbele et al. 2012).

In Abbildung 13 ist der Endenergieverbrauch in Deutschland, im Zeitraum von 2000 bis 2016, dargestellt. Im Durchschnitt lag der Endenergieverbrauch bei 9.091 PJ. Fossile Energieträger machten den größten Anteil am gesamten Endenergieverbrauch aus. Am bedeutendsten ist der Einsatz von Mineralölen mit 40 %, gefolgt von Gasen und Strom mit jeweils 25 % und 20 %. Fernwärme, erneuerbare Energieträger und sonstige Energieträger (inkl. Kohle) machten mit 4 bis 6 % lediglich einen geringen Anteil am gesamten Endenergieverbrauch aus (AGEB 2018). Bei den Energieträgern Strom und Fernwärme ist zu berücksichtigen, dass ein Teil des eingesetzten Stroms bzw. der Fernwärme aus der Umwandlung von erneuerbaren Energieträgern (z. B. Biomasse,

Wind- und Sonnenenergie) stammt. Bei der Bruttostromerzeugung¹⁴ stieg der Anteil an erneuerbaren Energien von 7 % im Jahr 2000 auf 30 % im Jahr 2016. Bei der Bruttowärmeerzeugung¹⁵ machten erneuerbare Energieträger im Jahr 2000 3 % des Energieeinsatzes aus. Bis ins Jahr 2016 stieg dieser Anteil auf 14 % (Eurostat 2019a).

Ungefähr die Hälfte des Endenergieverbrauchs wird zur Erzeugung von Wärme- und Kälte eingesetzt. Im Jahr 2016 lag der Anteil für Wärme- und Kälte am gesamten Endenergieverbrauch bei 56 % (5.089 PJ). Davon wurde 10 % (531 PJ) durch erneuerbare Energien (ohne die Anteile in Strom und Fernwärme) bereitgestellt, mit Holz als wichtigsten Energieträger (BMWi 2018a, AGEB 2019, BMWi 2019, Ziesing et al. 2019).



Anmerkung: * Aufteilung des Verbrauchs auf fossile und erneuerbare Energieträger erfolgt näherungsweise auf Grundlage von Informationen zum Anteil von erneuerbaren Energien an der Bruttostromerzeugung bzw. Bruttowärmeerzeugung.

Quellen: AGEB 2018, Eurostat 2019a

Abbildung 13: Endenergieverbrauch in Deutschland

Der Haushaltssektor hatte mit einem Verbrauch von durchschnittlich 2.520 PJ im Zeitraum von 2000 bis 2016 einen Anteil von bis zu 30 % am gesamten Endenergieverbrauch in Deutschland. Außerdem entfiel im Jahr 2000 85 % der erneuerbaren Energien (ohne der Anteile in Strom und Fernwärme) im Endenergieverbrauch auf den Haushaltssektor. Dieser Wert ging bis ins Jahr 2016 allerdings auf 50 % zurück, obwohl der absolute

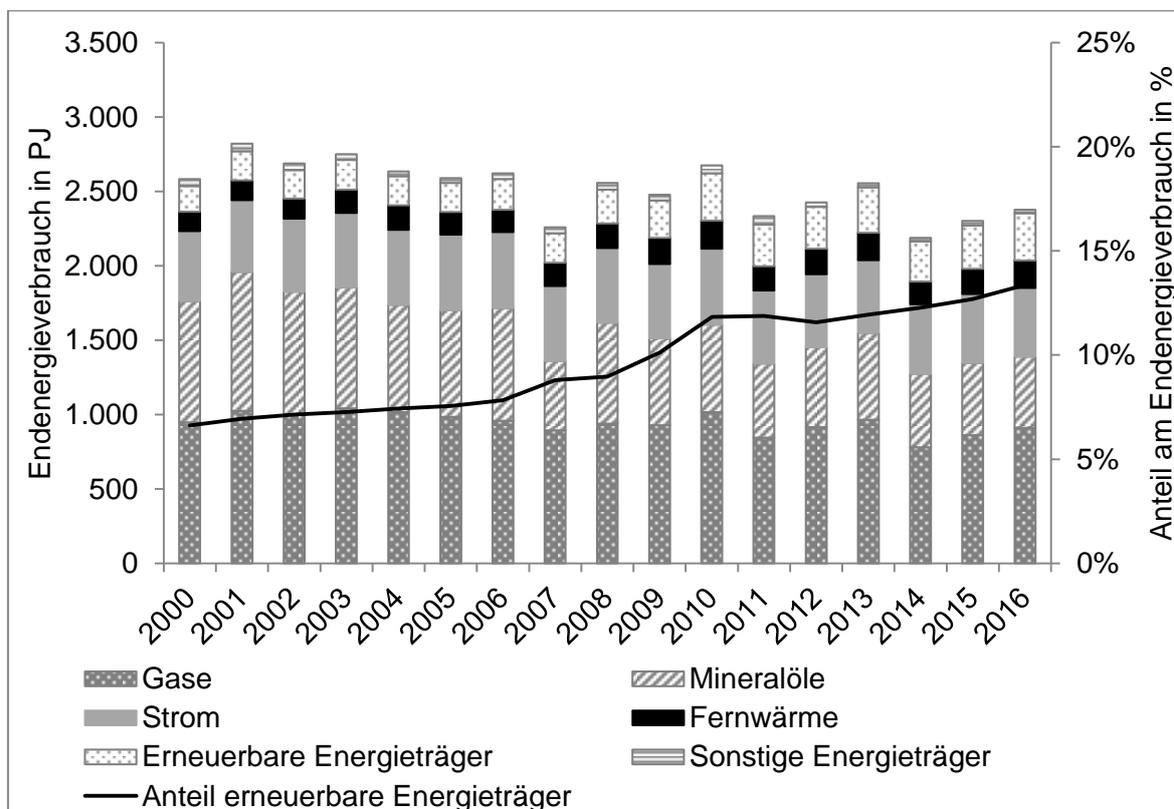
¹⁴ Bruttostromerzeugung umfasst die erzeugte Strommenge in Deutschland inklusive Eigenverbrauch im Umwandlungssektor und Netzverluste (UNSD 2018).

¹⁵ Bruttowärmeerzeugung umfasst die gesamte Wärmemenge, die in einem Land produziert wird (UNSD 2018).

Verbrauch an erneuerbaren Energien im Haushaltssektor stetig zunahm. Der Grund für den anteiligen Rückgang liegt im schnelleren Ausbau der erneuerbaren Energien bei den übrigen Endenergieverbrauchern (z. B. Industrie, Verkehr) (AGEB 2018).

Obwohl der Haushaltssektor einen Großteil der erneuerbaren Energien des Endenergieverbrauchs einsetzt, hatten die fossilen Energieträger Gas (38 %) und Mineralöl (20 %) sowie Strom (19 %) im Jahr 2016 die größten Anteile am Endenergieverbrauch im Haushaltssektor (Abbildung 14). Der Zuwachs von erneuerbaren Energien übertraf allerdings die Entwicklungen aller übrigen Energieträger. Im Zeitraum von 2000 bis 2016 stieg der Anteil von erneuerbaren Energien von 7 auf 13 % (AGEB 2018). Feste biogene Stoffe bzw. Holzenergie hatten die größten Anteile am Endenergieverbrauch von erneuerbaren Energien in Haushalten. Aufgrund der Markteintritte von neuen Technologien, wie z. B. Solarthermie und Umweltwärme, sank ihr Beitrag allerdings von 96 % im Jahr 2000 auf 77 % im Jahr 2016 (AGEB 2019).

Der Großteil des Endenergieverbrauchs in Haushalten entfiel auf den Wärme- und Kältesektor. Im Jahr 2016 wurde 2.242 PJ zur Erzeugung von Wärme und Kälte verwendet, was 94 % des gesamten Endenergieverbrauchs in Haushalten entsprach. 14 % (318 PJ) des Energiebedarfs für Wärme und Kälte wurde durch erneuerbare Energien gedeckt. Der Einsatz von erneuerbaren Energien in Haushalten machte 60 % des gesamten Einsatzes von erneuerbaren Energien im Wärme- und Kältesektor aus (Ziesing et al. 2019).



Quelle: AGEB 2018

Abbildung 14: Endenergieverbrauch im deutschen Haushaltssektor

4.3 Diskussion

Die energetische Verwendung von Holz im Haushaltssektor steht für ein Viertel der Holznutzung im deutschen Holzmarkt und weist nach der Sägeindustrie das zweitgrößte Nutzungsvolumen auf. Die hohe Nachfrage nach ähnlichen Holzsortimenten (z. B. Holz aus dem Wald) von Haushalten und stofflichen Verwendern (z. B. Holzwerkstoff- und Zellstoffindustrie) deutet auf eine potenzielle Rohstoffkonkurrenz hin, die allerdings durch die Verwendung unterschiedlicher Holzarten abgeschwächt wird (Mantau 2019).

Im Energiesektor zählt Brennholz zu den erneuerbaren Energieträgern, die im Endenergieverbrauch eine untergeordnete Rolle spielen. Allerdings hat die Bedeutung der erneuerbaren Energien in den vergangenen Jahren deutlich zugenommen. Haushalte verwenden traditionell einen Großteil dieser Energieträger, mit festen biogenen Stoffen bzw. Holz als wichtigsten erneuerbaren Energieträger (AGEB 2018). Der Zuwachs in den erneuerbaren Energien kann auf verschiedene Fördermaßnahmen zurückgeführt werden (Scheftelowitz und Thrän 2016, BMWi 2018b, BMF 2019, BMWi 2019). In Zukunft soll der Anteil an erneuerbaren Energien am Bruttoendenergieverbrauch von 19 % im Jahr 2021 auf 30 % im Jahr 2030 weiter ausgebaut werden. Im Endenergieverbrauch für Wärme und Kälte soll der Anteil an erneuerbaren Energien im selben Zeitraum von 15 auf 27 % steigen (BMWi 2019, EU 2018).

Die energetische Verwendung von Holz kann einen Beitrag zur Zielerreichung leisten (BMWi 2019). Waldwachstumsmodelle zeigen, dass im Jahr 2016 eine zusätzliche Holzentnahme aus dem Wald, von bis zu 51 Mio. m³ (471 PJ¹⁶), möglich gewesen wäre ohne die Wälder zu übernutzen oder auf Ressourcen der stofflichen Holzverwender zuzugreifen (vgl. Kapitel 4.1, Oehmichen et al. 2017, Mantau 2019). Bei einer energetischen Verwendung dieses Potenzials hätte im Jahr 2016 35 % der Wärme- und Kälteerzeugung im Haushaltssektor durch erneuerbare Energien gedeckt werden können. Für den gesamten Wärme- und Kältesektor hätte der Anteil bei 20 % gelegen (AGEB 2019, Ziesing et al. 2019).

Die energetische Holzverwendung in Haushalten wird von verschiedenen Faktoren beeinflusst. Beispielsweise können Beschränkungen in der Holzlagerung oder der regionalen Rohstoffverfügbarkeit Einfluss auf die Holzverwendung in Haushalten haben. Außerdem könnten niedrige Preise für alternative Energieträger die energetische Holzverwendung ökonomisch unattraktiv machen oder milde Temperaturen den Energiebedarf senken. Um die Einflüsse auf die Brennholzverwendung in Haushalten zu untersuchen, analysierten Glasenapp et al. (2019b) umfangreiche Mikrodatensätze. In Kapitel 5 werden die Erkenntnisse der Analyse vorgestellt und diskutiert.

¹⁶ Berechnet über einen Umrechnungsfaktor von 9,232 PJ/Mio. m³, unter den Annahmen: 54 % Nadelholz und 18 % Holzfeuchte (vgl. Kapitel 2, Oehmichen et al. 2017, Mantau 2019).

5 Ökonometrische Analyse der Einflüsse auf den energetischen Holzeinsatz im deutschen Haushaltssektor

Die bedeutende Rolle des Haushaltssektors für den Holzmarkt und die Zielsetzungen für den Energiesektor (vgl. Kapitel 4) erfordern gute Kenntnisse über den Einfluss von Faktoren auf die energetische Holzverwendung in Haushalten. Für verschiedene europäische Länder (Vaage 2000, Arabatzis und Malesios 2011, Couture et al. 2012) und Nordamerika (Garbacz 1985, Hardie und Hassan 1986, Tonn und White 1988, Skog und Manthy 1989, Song et al. 2012) wurden Untersuchungen zum Einfluss von Variablen auf den energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor durchgeführt. Dabei konnten Variablen, wie z. B. Preise für alternative Energieträger und Haushaltscharakteristika, identifiziert werden, die mit dem Holzeinsatz in Haushalten signifikant korreliert waren.

Für den deutschen Haushaltssektor existierte bisher lediglich eine Studie, in der der Einfluss von Temperatur und Preisen für alternative Energieträger auf den energetischen Holzeinsatz untersucht wurde. Für die Analyse wurden jährliche Verbrauchswerte des gesamten Haushaltssektors und keine individuellen Haushaltsdaten verwendet (vgl. Kapitel 3.2, Jochem et al. 2015).

Glasesnapp et al. (2019b) führten eine ökonometrische Analyse des energetischen Holzeinsatzes in deutschen Haushalten mit individuellen Haushaltsangaben zu den Jahren 2005, 2010 und 2014 durch. Die Arbeit verfolgt das Ziel, Zusammenhänge zwischen dem energetischen Holzeinsatz in einem deutschen Haushalt und unabhängigen Variablen nachzuweisen und zu quantifizieren. Mit den Ergebnissen können Variationen im energetischen Holzverbrauch des Haushaltssektors erklärt werden (vgl. Kapitel 3). Außerdem bieten die Ergebnisse Erkenntnisse über Handlungsmöglichkeiten, um die energetische Holzverwendung im Haushaltssektor zu beeinflussen.

Im Folgenden wird die Arbeit von Glasesnapp et al. (2019b) vorgestellt. In Kapitel 5.1 bis 5.3 werden die Methode, der Datensatz und das theoretische Modell beschrieben. Im Anschluss werden in Kapitel 5.4 die Ergebnisse präsentiert und in Kapitel 5.5 diskutiert.

5.1 Methode

Der spezifische Brennholzeinsatz (EH) eines Haushalts ist die abhängige Variable des Modells. Um Variationen im Holzeinsatz eines Haushalts zu erklären, umfasst der Datensatz unabhängige bzw. erklärende Variablen mit Bezug zur 1) Heiztechnologie, Wohnungseigenschaften und alternativen Energieträgern, 2) Zugang zu Holzrohstoffen und Temperatur sowie 3) Einkommen und sonstige Wohnungsmerkmale. Alle berücksichtigten Variablen sind in Tabelle 11 dargestellt. Die Auswahl der Variablen folgt einer ausführlichen Literaturrecherche (Vaage 2000, Arabatzis und Malesios 2011, Couture et al. 2012, Garbacz 1985, Hardie und Hassan 1986, Tonn und White 1988, Skog und Manthy 1989, Song et al. 2012, Jochem et al. 2015, Skog und Watterson 1984).

Die eingesetzte Heiztechnologie beeinflusst den energetischen Holzeinsatz (Vaage 2000, Couture et al. 2012). In einer binären Variable (ZH) werden Haushalte identifiziert, die Holz in Zentralheizungen, inklusive Kombinationen aus Holzzentralheizung und Einzelraumfeuerungsanlagen (z. B. Kamin oder Ofen), verwenden. In Holzzentralheizungen wird

Holz als primärer Energieträger verwendet und es ist davon auszugehen, dass die Variable positiv mit dem energetischen Holzeinsatz in Haushalten assoziiert ist.

In anderen Ländern war die Wohnfläche (WF) positiv und signifikant mit dem energetischen Holzeinsatz in Haushalten korreliert (Vaage 2000, Arabatzis und Malesios 2011, Tonn und White 1988, Song et al. 2012). Auch das Fertigstellungsjahr eines Gebäudes (FJ) ist mit dem energetischen Holzeinsatz korreliert (Vaage 2000, Couture et al. 2012, Song et al. 2012). Für neue Wohngebäude werden in Deutschland höhere Anforderungen an die Gebäudedämmung gestellt (BMJV 2013). Aus diesem Grund wird davon ausgegangen, dass Wohnungen in neueren Gebäuden, aufgrund des niedrigeren Energiebedarfs, weniger Holzenergie einsetzen als Wohnungen in älteren Gebäuden. Auch die Art der Wohnung (Vaage 2000, Arabatzis und Malesios 2011, Tonn und White 1988) und das Besitzverhältnis (Vaage 2000) hat Einfluss auf den energetischen Holzeinsatz in Haushalten. Diese Effekte werden durch eine Variable zur Wohnungsart (WA) berücksichtigt, die vier Kategorien aufweist. Es ist davon auszugehen, dass Haushalte in Ein- und Zweifamilienhäusern mehr Holzenergie verbrauchen als Haushalte in Mehrfamilienhäusern. Außerdem wird angenommen, dass Eigentümer mehr Brennholz verbrauchen als Mieter.

Preise für alternative Energieträger (AP) können den Brennholzeinsatz in Haushalten beeinflussen (Garbacz 1985, Hardie und Hassan 1986, Song et al. 2012, Jochem et al. 2015, Skog und Watterson 1984). Der gewichtete Mittelwert aus Preisen für Gas, Heizöl und Strom steht für das Preisniveau alternativer Energieträger. Für die Gewichtung der Preise wird die Verteilung der Heizungsanlagen des Wohnungsbestands verwendet. Es ist davon auszugehen, dass Preise für alternative Energieträger, aufgrund von Substitutions- und Einkommenseffekten, positiv mit dem energetischen Holzeinsatz korreliert sind. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass keine Informationen zu Brennholzpreisen verfügbar waren und daher nicht im Modell verwendet werden konnten. Song et al. (2012) hatten bei ihrer Modellierung ähnliche Schwierigkeiten und rechtfertigten den Ausschluss der Preise damit, dass Brennholzpreise und der Holzverbrauch mit denselben unabhängigen Variablen bestimmt werden. Damit stellt eine Regression ohne Brennholzpreise ein reduziertes Modell dar, das eine konsistente Schätzung des energetischen Holzeinsatzes erlaubt (Greene 2002, Jarrow und Protter 2004, Varian 1992).

Auch der Zugang zu Holzrohstoffen oder das Klima haben Einfluss auf den energetischen Holzeinsatz in Haushalten. Obwohl davon auszugehen ist, dass der Besitz von Waldflächen (WB) den Zugang zu Brennholz verbessert und die Brennholznutzung erhöht, wurde diese Variable bisher nicht verwendet. Allerdings berücksichtigten Couture et al. (2012) eine allgemeinere Variable, die den Zugang zu Holzrohstoffen anzeigt. Neben dem Waldbesitz, zeigt die Walddichte (WD) die Verfügbarkeit von Brennholz an. Es wird davon ausgegangen, dass die Walddichte in einer Region positiv auf die energetische Holzverwendung in Haushalten derselben Region wirkt. Skog und Manthy (1989) und Song et al. (2012) konnten nachweisen, dass der energetische Holzeinsatz von Haushalten in ländlichen Regionen tendenziell höher war als der von Haushalten in urbanen Regionen. Eine Variable mit sechs Kategorien erfasst die Effekte des Urbanisierungsgrads (UB) auf die energetische Holzverwendung.

Kalte Temperaturen haben einen positiven Einfluss auf die energetische Holzverwendung (Vaage 2000, Song et al. 2012, Jochem et al. 2015) und wurden durch regionale Heizgradtage (GT) berücksichtigt. Heizgradtage werden nach Formel 4 (Kapitel 3.2.1) berechnet und nehmen bei kalten Temperaturen hohe Werte an. Aus diesem Grund ist eine positive Korrelation von Heizgradtagen und dem energetischen Holzeinsatz zu erwarten. Allgemeinere regionale Unterschiede, wie z. B. die Einstellung zur Brennholzverwendung oder regionale politische Einflussnahme, können durch Standortinformationen der Haushalte erfasst werden (Hardie und Hassan 1986, Song et al. 2012). Im Folgenden wird der Standort eines Haushalts (ST) durch vier Kategorien berücksichtigt.

Die soziodemografischen Eigenschaften eines Haushalts beeinflussen ebenfalls den energetischen Holzeinsatz. Es konnte nachgewiesen werden, dass größere Haushalte mehr Holzenergie verwenden (Vaage 2000, Arabatzis und Malesios 2011, Couture et al. 2012, Hardie und Hassan 1986, Song et al. 2012). Um diesen Effekt zu erfassen, werden fünf Kategorien zur Haushaltsgröße (HG) berücksichtigt, die mit der Klassenverteilung des deutschen Mikrozensus übereinstimmen. Potenzielle Änderungen der Wirkungszusammenhänge in Abhängigkeit von der Wohnfläche wurden durch Interaktionsterme beider Variablen berücksichtigt. Auch das Haushaltseinkommen ist mit dem energetischen Holzeinsatz in Haushalten assoziiert (Vaage 2000, Arabatzis und Malesios 2011, Couture et al. 2012, Hardie und Hassan 1986, Tonn und White 1988, Song et al. 2012, Berry 2014). In dem Modell wird das monatliche Nettoeinkommen eines Haushalts (NE) durch fünf Kategorien berücksichtigt. Es ist zu erwarten, dass Haushalte der unteren Einkommenskategorien, aufgrund von Preisvorteilen, mehr Holz zum Heizen verwenden. Um regionale Einkommensunterschiede zu berücksichtigen, wurden Interaktionsterme zwischen Einkommen und Standort eines Haushalts berechnet. Song et al. (2012) zeigte, dass das Alter des Haushaltsvorstandes (AL) mit dem energetischen Holzeinsatz korreliert ist. Aus diesem Grund wird diese Variable berücksichtigt und davon ausgegangen, dass ältere Menschen, aufgrund der verhältnismäßig höheren Arbeitsintensivität der energetischen Holznutzung, weniger Brennholz verwenden.

Tabelle 11: Im Tobit-Modell berücksichtigte Variablen

Variablenbezeichnung	Einheit	Abkürzung
Abhängige Variable		
Energetischer Holzeinsatz	Holz in Festmeter (m ³) pro Jahr in einem Haushalt (ohne Holzkohle)	EH
Unabhängige Variable		
<i>Wohnungseigenschaften</i>		
Haushalt mit Holzzentralheizung	1 = ja, Haushalt nutzt Holzzentralheizung; 0 = nein, Haushalt nutzt keine Holzzentralheizung.	ZH
Bewohnte Fläche der Wohnung	Quadratmeter (m ²)	WF
Jahr der Fertigstellung des Wohnungsgebäudes	Jahr	FJ

Variablenbezeichnung	Einheit	Abkürzung
Art der Wohnung	1 = Eigentümer in Mehrfamilienhaus; 2 = Mieter in Mehrfamilienhaus; 3 = Eigentümer in Ein-/Zweifamilienhaus; 4 = Mieter in Ein-/Zweifamilienhaus.	WA
Mittelwert der jährlichen Preise für Gas, Öl und Strom, gewichtet nach Heizungsstruktur in Deutschland	\$US pro Tonne Rohöläquivalente (t ROE)	AP
<i>Umwelteinfluss</i>		
Besitz von Waldflächen	1 = ja, Haushalt besitzt Waldfläche; 0 = nein, Haushalt besitzt keine Waldfläche.	WB
Grad der Urbanisierung einer Gemeinde in Bewohnern	1 = < 5.000 Einwohner; 2 = 5.000 – 19.999 Einwohner; 3 = 20.000 – 49.999 Einwohner; 4 = 50.000 – 99.999 Einwohner; 5 = 100.000 – 499.999 Einwohner; 6 = ≥ 500.000 Einwohner.	UB
Walddichte einer Gemeinde	Verhältnis von Waldfläche pro gesamter Gemeindefläche	WD
Heizgradtage pro Jahr	°Celsius	GT
Standort eines Haushalts	1 = Norden; 2 = Westen; 3 = Süden; 4 = Osten.	ST
<i>Soziodemografische Eigenschaften</i>		
Haushaltsgröße	1 = 1 Person; 2 = 2 Personen; 3 = 3 Personen; 4 = 4 Personen; 5 = ≥ 5 Personen.	HG
Monatliches Nettoeinkommen eines Haushalts nach Steuern, inkl. Einkommen aus Pensionsansprüchen, Mieteinnahmen und Kapitalerträgen	1 = < 1000 Euro; 2 = 1.000 – 1.999 Euro; 3 = 2.000 – 2.999 Euro; 4 = 3.000 – 3.999 Euro; 5 = ≥ 4.000 Euro.	NE
Alter des Haushaltsvorstandes	Jahr	AL

Quelle: Glasenapp et al. 2019b

5.2 Datensatz

In Kapitel 5.2.1 wird das Vorgehen zur Erfassung und Aufbereitung der Stichprobendaten beschrieben. Anschließend werden in Kapitel 5.2.2 die Merkmalsverteilungen aus der Stichprobe für den gesamten Haushaltssektor in den Jahre 2005, 2010 und 2014 dargestellt. In Kapitel 5.2.3 werden Brennholznutzer für das Jahr 2014 charakterisiert.

5.2.1 Datenerfassung und -aufbereitung

Haushaltsdaten stammen aus empirischen Stichprobenerhebungen zu den Jahren 2005, 2010 und 2014. Die Datensätze wurden im Rahmen der Erhebungen des Rohstoffmonitoring Holz (vgl. Kapitel 3.2) von einem Marktforschungsinstitut (F&I GmbH Marktforschung) erfasst und um Sekundärdaten (z. B. Preise für alternative Energieträger und Heizgradtage) erweitert. F&I GmbH Marktforschung unterhält ein Haushaltspanel mit 25.000 zufällig ausgewählten Haushalten aus dem deutschen Wohnungsbestand. Die Haushalte des Panels haben sich verpflichtet an Befragungen teilzunehmen. In den Jahren 2006, 2011 und 2015 wurden jeweils ca. 10.000 Haushalte zufällig aus dem Panel ausgewählt und zu ihrem spezifischen Brennholzeinsatz sowie Haushaltseigenschaften des zurückliegenden Jahres (2005, 2010 und 2014) befragt. Während der Befragungen wurden die Stichproben auf Repräsentativität bezüglich der regionalen Verteilung, Haushaltsgröße sowie Alter und Beschäftigungsverhältnis des Haushaltsvorstandes untersucht. Bei verzerrten Merkmalsausprägungen wurden zusätzliche Haushalte in die Stichproben aufgenommen, bis diese den Angaben des Mikrozensus entsprachen (Mikrozensus 2008, Mikrozensus 2012, Mikrozensus 2016). Das verwendete Auswahlverfahren impliziert, dass einige Haushalte in den Erfassungsjahren mehrmals befragt werden konnten. Da die Erfassung allerdings nicht als klassisches Panel mit wiederholten Befragungen durchgeführt wurde, nahm die Mehrzahl (55 %) der Haushalte lediglich einmal an einer Befragung teil. 29 % der Haushalte waren an zwei und 16 % an allen drei Befragungen beteiligt.

Ergebnisse aus den Erhebungen werden unter anderem von der Arbeitsgemeinschaft Erneuerbare Energiestatistik (AGEE-Stat) und dem Thünen-Institut für internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie (TI-WF) verwendet. AGEE-Stat nutzt die Daten für die offizielle Zeitreihenbildung für Deutschland (vgl. Kapitel 3.1) und berichtet die Daten an die Europäische Kommission (vgl. Kapitel 6.6). TI-WF verwendet die Daten für die Berichterstattung an den UNECE/FAO Joint Wood Energy Enquiry (vgl. Kapitel 6.5). Außerdem berechneten Jochem et al. (2015) und Mantau (2015) auf Grundlage dieser Ergebnisse den energetischen Holzverbrauch im Haushaltssektor (vgl. Kapitel 3.2).

In den Fragebögen kann der energetische Holzeinsatz für verschiedene Holzsortimente (z. B. Scheitholz, Hackschnitzel und Holzpellets) und Einheiten (z. B. Kubikmeter in Schüttraummeter, Tonnen) angegeben werden. Für die folgende Analyse wurden diese Daten zu einem Verbrauchswert in Festmeter (m^3) umgerechnet (Döring et al. 2016). Angaben zum energetischen Holzeinsatz wurden außerdem auf potenzielle Ausreißer untersucht, die mehr als das Zehnfache des Standardfehlers vom korrespondierenden, jährlichen Mittelwert abwichen (Song et al. 2012). In der Befragung zum Jahr 2005 wurde ein Extremwert, für das Jahr 2010 zwei und für das Jahr 2014 drei Extremwerte identifiziert und aus den Stichproben entfernt. Die finalen Stichproben zu den Jahren 2005, 2010 und 2014 umfassen jeweils 8.202, 6.371 und 7.043 Haushaltsangaben. Für die ökonomische Analyse wurden die Datensätze zu einem Datensatz mit 21.616 Haushaltsangaben zusammengefasst, in dem 4.415 Haushalte angaben, dass sie Brennholz nutzten.

Neben den Angaben aus der Stichprobenerhebung wurde dem Datensatz Sekundärdaten zugeordnet. Für einige Variable konnte die Zuordnung durch Regionalinformationen (z. B. Postleitzahl) verfeinert werden (Douthitt 1989). Heizgradtage sind den Haushalten

beispielsweise nach Postleitzahlgebieten (DWD 2017) und Walddichte über Gemeindeinformationen (StABL 2017) zugeordnet. Gewichtete Preise für alternative Energieträger sind jahresspezifische Werte (OECD/IEA 2018, BDEW 2017).

Vor der ökonometrischen Analyse wurden Gewichtungsfaktoren durch iterative Post-Stratifizierung berechnet (Valliant 1993, Rao et al. 2002, Lumley 2018). Die Faktoren stellen sicher, dass die Stichproben für die Merkmalsverteilungen von Urbanisierungsgrad, Haushaltsgröße und Alter sowie regionale Verteilung mit offiziellen Angaben des Mikrozensus übereinstimmen (Mikrozensus 2008, Mikrozensus 2012, Mikrozensus 2016). Um den Einfluss von potenziellen Ausreißern zu mindern, wurden die Gewichtungsfaktoren auf Werte zwischen 0,3 und 3 beschränkt. Außerdem wurden die Gewichtungsfaktoren der einzelnen, jährlichen Stichprobenerhebungen erneut gewichtet, um einen gleichen jährlichen Einfluss aller Erfassungsjahre zu gewährleisten. Faktoren für die Gewichtung (w_y) wurden aus Formel 5, unter der Bedingung, dass $w_{05}n_{05} = w_{10}n_{10} = w_{14}n_{14}$ gilt, berechnet. n_y steht dabei für die Anzahl der Nennungen einer Stichprobe in einem Jahr und N als die Summe über alle n_y .

$$N = w_{05}n_{05} + w_{10}n_{10} + w_{14}n_{14} \quad (5)$$

5.2.2 Deskriptive Statistik für die Jahre 2005, 2010 und 2014

Zur Validierung der Merkmalsverteilungen wurde der Datensatz, wenn möglich, mit Angaben aus der Literatur verglichen. Beispielsweise gaben in jedem Jahr 2 % der Haushalte an, Brennholz in Holzzentralheizungen zu verwenden. Diese Angabe stimmt mit den Angaben des Mikrozensus überein, in denen 1,8 %, 2,2 % und 2,6 % der Haushalte in den Jahren 2006, 2010 und 2014 Holzenergie als primären Energieträger in Sammelheizungen einsetzten (Mikrozensus 2008, Mikrozensus 2012, Mikrozensus 2016). Die Stichprobendaten legen außerdem nahe, dass der gewichtete Durchschnitt der Wohnfläche im Zeitraum von 2005 bis 2014 von 107 m² auf 100 m² sank. Das gewichtete Mittel des Fertigstellungsjahr stieg leicht von 1962 im Jahr 2005 auf 1963 im Jahr 2014, was mit den Angaben des Mikrozensus übereinstimmt (Mikrozensus 2008, Mikrozensus 2012, Mikrozensus 2016). Jährliche Preise für alternative Energieträger stiegen von 891 \$US/t ROE im Jahr 2005 auf 1.322 \$US/t ROE im Jahr 2014. Angaben zum Waldbesitz zeigen, dass 2 % der befragten Haushalte Waldflächen besaßen, was Literaturangaben entspricht, die angeben, dass 1,6 bis 3,0 % der deutschen Bevölkerung Wald besitzen (Volz 2001, Feil et al. 2018). Der gewichtete Mittelwert für Walddichte blieb in allen Jahren konstant bei 25 %. Heizgradtage nahmen mit 4.090 °C die höchsten Werte im Jahr 2010 und mit 3.113 °C die niedrigsten Werte im Jahr 2014 an. Die gewichteten Durchschnittswerte zum Alter des Haushaltsvorstandes stiegen von 52 Jahren im Jahr 2005 auf 54 Jahre im Jahr 2014.

Stichprobendaten zur Wohnungsart verdeutlichen, dass die Mehrzahl der befragten Haushalte entweder als Eigentümer in Ein- und Zweifamilienhäusern oder als Mieter in Mehrfamilienhäusern wohnten. Im Zeitraum von 2005 bis 2014 sank der Anteil von Mietern in Ein- und Zweifamilienhäusern um 2 Prozentpunkte, was Angaben des Mikrozensus bestätigen (Mikrozensus 2008, Mikrozensus 2012, Mikrozensus 2016). Der Anteil von Haushalten in urbanen (UB: ≥ 500.000) und ländlichen (UB: 5.000 – 49.000) Gemeinden nahm im Zeitraum von 2005 bis 2014 zu. Im selben Zeitraum sanken die

Anteile an Haushalten in sehr ländlichen (UB: < 5.000) und gering urbanisierten (UB: 100.000 – 499.000) Gemeinden. Aus den Stichprobendaten zur Haushaltsgröße geht hervor, dass die Anteile von Ein- und Zwei-Personen-Haushalten zunahmen. Ergebnisse zum Urbanisierungsgrad und Haushaltsgröße stimmen mit Angaben des Mikrozensus überein (Mikrozensus 2008, Mikrozensus 2012, Mikrozensus 2016). Außerdem bestätigen die Angaben des Mikrozensus die Stichprobenergebnisse zur regionalen Wohnungsverteilung (Mikrozensus 2008, Mikrozensus 2012, Mikrozensus 2016). Die meisten Wohnungen befinden sich in Westdeutschland, obwohl der Anteil in Süddeutschland seit dem Jahr 2005 um 1 % zunahm. Im Zeitraum von 2005 bis 2014 ging der Anteil von Haushalten der mittleren Einkommenskategorien zurück (- 7 %). Im selben Zeitraum verzeichneten Haushalte mit einem monatlichen Nettoeinkommen von mindestens 3.000 Euro einen entsprechenden Zuwachs. Tabellen in Anhang A.V, A.VI und A.VII zeigen die Statistiken der drei Erfassungsjahre 2005, 2010 und 2014. Es sind Minimum, Maximum, Mittelwerte und gewichtete Mittelwerte sowie entsprechende Standardfehler als Maß für die Streuung angegeben.

5.2.3 Charakterisierung der Brennholznutzer für das Jahr 2014

Jeweils 14, 22 und 20 % der Haushalte verwendeten in den Jahren 2005, 2010 und 2014 Brennholz. Für das Jahr 2014 wurden die Wohnungseigenschaften und sozioökonomischen Eigenschaften von Brennholznutzern mit denen des Wohnungsbestands verglichen. Zu den berücksichtigten Wohnungseigenschaften zählen der Urbanisierungsgrad, Art der Wohnung, Jahr der Fertigstellung und Wohnfläche. Die metrischen Variablen zum Jahr der Fertigstellung und Wohnfläche wurden für die Betrachtung in kategoriale Variablen umgewandelt. Standardfehler (SF_b) zur Berechnung der Konfidenzintervalle wurden nach Formel 6 berechnet (Bortz 2005),

$$SF_b = \sqrt{\frac{\bar{x}(1-\bar{x})}{n}} \quad (6)$$

mit \bar{x} als Prozentwert eines Merkmals und n für die Stichprobengröße. Alle angegebenen Konfidenzintervalle beziehen sich auf ein Signifikanzniveau von 5 %.

Wie in Abbildung 15 zu sehen ist, war der überwiegende Anteil (67 %) an Brennholznutzern in ländlichen Regionen anzutreffen. Damit unterschied sich die Verteilung der Brennholznutzer signifikant von der des gesamten Wohnungsbestands, bei dem etwa ein Drittel aller Wohnungen (38 %) in ländlichen Regionen und ein weiteres Drittel (34 %) in urbanen Räumen angesiedelt war. Mantau und Sörgel (2006) und Hick und Mantau (2008) erklären diesen Zusammenhang damit, dass Haushalte in urbanen Regionen schwerer an Holzbrennstoffe gelangen als Haushalte in ländlichen Regionen. Mantau (2012) weist außerdem darauf hin, dass insbesondere Ein- und Zweifamilienhäuser überproportional häufig in ländlichen Regionen vertreten sind und die Brennholznutzung in dieser Gebäudeart stärker ausgeprägt ist. Mit 87 % waren Brennholzverbraucher in Ein- und Zweifamilienhäuser im Vergleich zu 50 % im gesamten Wohnungsbestand überrepräsentiert vertreten. Bei vermieteten Wohnungen in Mehrfamilienhäusern war der Anteil an Brennholznutzern (3 %) gegenüber dem Wohnungsbestand (40 %) deutlich unterrepräsentiert.

Bei Betrachtung des Gebäudealters fällt auf, dass Brennholznutzer in der Kategorie 1949 bis 1978 im Vergleich zum gesamten Wohnungsbestand unterrepräsentiert und in der Kategorie 2001 bis 2010 überrepräsentiert vertreten waren. Insbesondere im Zeitraum von 2001 bis 2010 wurde die energetische Holzverwendung durch Investitionsanreize gefördert (vgl. Kapitel 4.1, BMF 2019), was den höheren Anteil von Brennholznutzern bei Neubauten in dieser Kategorien erklären könnte.

In Wohnungen mit großer Wohnfläche waren Brennholznutzer im Vergleich zum Wohnungsbestand deutlich häufiger und in Wohnungen mit kleiner Wohnfläche seltener vertreten. Die Ergebnisse deuten auf Querbezüge zwischen Wohnungseigenschaften hin. Wohnungen mit großer Wohnfläche sind vermutlich mit Ein- und Zweifamilienhäuser in ländlichen Gebieten assoziiert, die ebenfalls eine hohe Affinität zur energetischen Holznutzung aufwiesen (Mantau 2012).

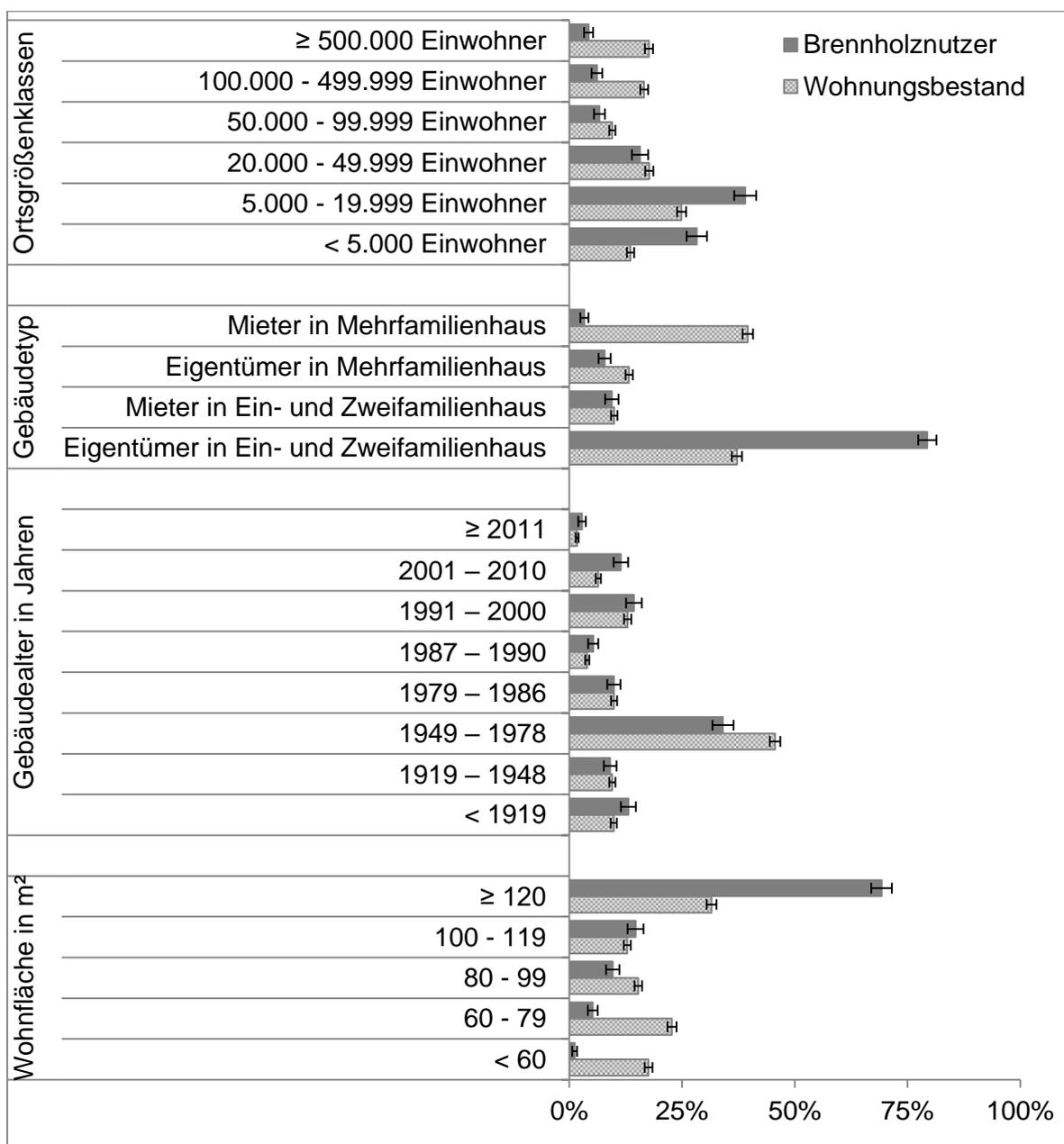


Abbildung 15: Verteilung der Brennholznutzer und des Wohnungsbestands nach Wohnungseigenschaften

Neben den Wohnungseigenschaften wurden sozioökonomische Eigenschaften zum Alter des Haushaltsvorstandes, Nettoeinkommen und Haushaltsgröße betrachtet. Die Variable zum Alter des Haushaltsvorstandes wurde hierfür in sieben Kategorien unterteilt. Abbildung 16 ist zu entnehmen, dass Brennholznutzer mit einem Haushaltsvorstand im Alter von 40 bis 49 Jahren im Vergleich zum Wohnungsbestand überrepräsentativ vertreten waren. In den oberen Altersklassen waren Brennholznutzer im Vergleich zum Wohnungsbestand unterrepräsentativ vertreten. Wie bereits von Mantau und Sörgel (2006), Hick und Mantau (2008) und Mantau (2012) angemerkt, deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die energetische Holznutzung im mittleren Lebensabschnitt stattfindet, in der auch das Familienleben wichtig ist. Junge und ledige sowie ältere Menschen haben weniger Anteil an der energetischen Holzverwendung.

Im Vergleich zum gesamten Wohnungsbestand fällt auf, dass Haushalte mit hohem monatlichem Nettoeinkommen (≥ 2.000 Euro) eher dazu tendieren Brennholz zu nutzen als Haushalte der unteren Einkommenskategorien. So gaben beispielsweise 8 % aller Haushalte und 15 % der Brennholznutzer ein monatliches Nettoeinkommen von mehr als 4.000 Euro an. In der niedrigsten Einkommenskategorie (< 1.000 Euro) war dieses Verhältnis mit 11 % im Wohnungsbestand und 4 % unter den Brennholznutzern nahezu umgekehrt.

Brennholzverbraucher waren in Ein-Personen-Haushalten im Vergleich zum Wohnungsbestand deutlich seltener vertreten. Mantau (2012) führt die Popularität der Holznutzung in größeren Haushalten darauf zurück, dass größere Haushalte eher in Eigenheimen und in ländlichen Regionen anzutreffen sind. Dieser Zusammenhang verdeutlicht ein weiteres Mal, dass sich Effekte zum Teil vermischen. Aus diesem Grund werden Wirkungszusammenhänge zwischen verschiedenen Variablen und dem durchschnittlichen Brennholzverbrauch im Folgenden in einer multivariaten Analyse untersucht.

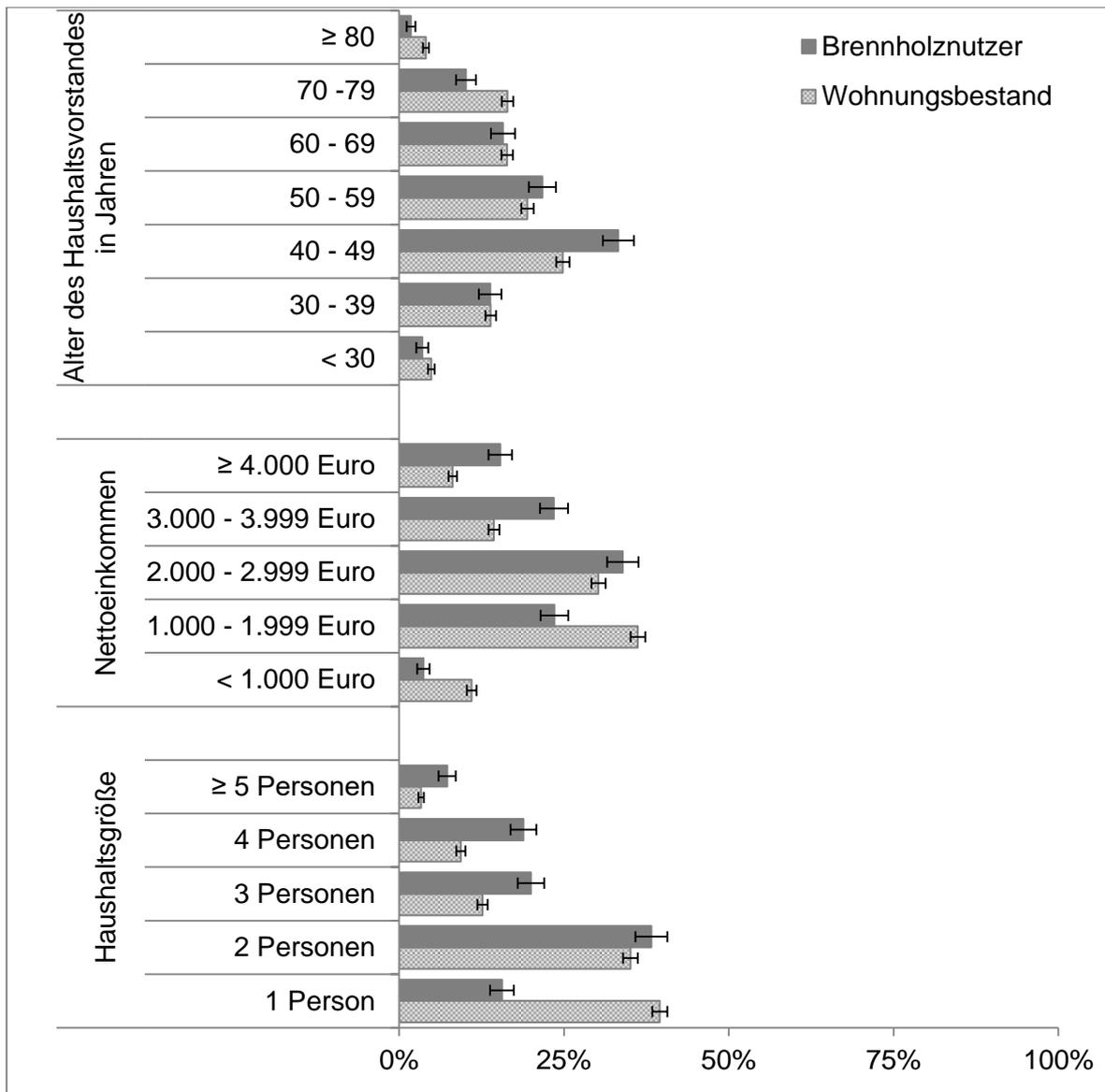


Abbildung 16: Verteilung der Brennholznutzer und des Wohnungsbestands nach sozioökonomischen Eigenschaften

5.3 Theoretisches Modell

Da Haushalte im gesamten Wohnungsbestand überwiegend kein Holz zum Heizen verwenden (vgl. Kapitel 5.2, Arabatzis and Malesios 2011, Couture et al. 2012, Song et al. 2012, Aguilar et al. 2016), wählten Glasenapp et al. (2019b) für die Analyse des energetischen Holzeinsatzes im Haushaltssektor ein linkszensiertes Tobit-Modell nach Arabatzis und Malesios (2011) und Song et al. (2012). Das Tobit-Modell berücksichtigt die große Anzahl an Haushalten, die keinen Holzeinsatz angeben, indem es den energetischen Holzverbrauch (y), wie in Formel 7 angegeben, entweder durch Nullwerte für Haushalte ohne Holzverbrauch oder positive Werte für Haushalte mit Holzverbrauch modelliert (Wooldridge 2010).

$$y = \max(0, y^*) \quad (7)$$

y^* steht hierbei für eine latente Variable, die den energetischen Holzverbrauch größer Null, in Abhängigkeit von unabhängigen Variablen schätzt. Die Schätzung des energetischen Holzeinsatzes durch die latente Variable erfolgt wie in Formel 8 dargestellt.

$$y^* = \mathbf{X}\boldsymbol{\beta} + u \quad (8)$$

\mathbf{X} steht hierbei für eine Matrix aus unabhängigen Variablen. Neben den unabhängigen Variablen aus Kapitel 5.1, enthält \mathbf{X} Interaktionsterme zwischen den unabhängigen Variablen und den Erfassungsjahren (2005, 2010 und 2014). Durch die Interaktionsterme werden jährliche Änderungen im Heizverhalten erfasst. $\boldsymbol{\beta}$ steht für einen Vektor aus Regressionskoeffizienten und u für den normalverteilten Fehlerterm. Modellkoeffizienten und die Varianz werden durch eine Maximum-Likelihood-Schätzung bestimmt. Die zu maximierende Likelihood-Funktion ist in Formel 9 dargestellt.

$$\log L = \sum_{i=1}^{N_1} \left[\log \Phi \left(-\frac{\mathbf{x}_i \boldsymbol{\beta}}{\sigma} \right) \right] + \sum_{j=1}^{N_2} \left[\log \varphi \left(-\frac{y_j - \mathbf{x}_j \boldsymbol{\beta}}{\sigma} \right) - \ln(\sigma) \right]. \quad (9)$$

$i = 1, \dots, N_1$ identifiziert alle Haushalte ohne Holzeinsatz ($y = 0$) und $j = N_1 + 1, \dots, N_2$ alle Haushalte mit einem positiven Holzeinsatz ($y > 0$). $\Phi(\cdot)$ und $\varphi(\cdot)$ stehen für die Verteilungs- und Dichtefunktion der Standardnormalverteilung. Aufgrund der nichtlinearen Funktion lassen sich Wirkungszusammenhänge nicht direkt aus den Regressionskoeffizienten ablesen (Moosmüller 2004, Wooldridge 2010). Daher werden marginale Effekte für die Interpretation der Wirkungszusammenhänge verwendet (Couture et al. 2012, Song et al. 2012). McDonald und Moffitt (1980) geben für die Berechnung des marginalen Effektes einer ausgewählten unabhängigen Variable x_p Formel 10 an.

$$\frac{\partial E(y|x)}{\partial x_p} = \beta_p \Phi \left(\frac{\mathbf{x} \boldsymbol{\beta}}{\sigma} \right), \quad (10)$$

\mathbf{x} stellt dabei einen Vektor aller gewichteten Mittelwerte der unabhängigen Variablen in einem Jahr (2005, 2010 oder 2014) dar. β_p und x_p stehen für den Regressionskoeffizienten bzw. gewichteten Mittelwert der ausgewählten unabhängigen Variable (p) im jeweiligen Jahr. Unter der Voraussetzung, dass sich die übrigen Variablen nicht verändern, ermöglichen marginale Effekte die Interpretation von Auswirkungen einer Änderung in einer Variablen auf den Holzverbrauch eines durchschnittlichen deutschen Haushalts. In diesem Zusammenhang steht β_p für den direkten Effekt einer Änderung in einer Variable auf den Holzverbrauch. $\Phi(\cdot)$ steht für einen indirekten Effekt, der durch Veränderungen der Anzahl an Holzheizern im Wohnungsbestand entsteht (Wooldridge 2010, Song et al. 2012).

Wenn Variablen Interaktionsterme umfassen, werden marginale Effekte durch Formel 11 berechnet (Wooldridge 2010, McDonald und Moffitt 1980),

$$\frac{\partial E(y|x)}{\partial x_j} = (\beta_j + \sum_{k=1}^K \beta_k x_k) \Phi \left(\frac{\mathbf{x} \boldsymbol{\beta}}{\sigma} \right), \quad (11)$$

wobei K die mit x_j interagierenden Variablen identifiziert. β_k steht für den entsprechenden Regressionskoeffizient und x_k steht für den gewichteten Mittelwert der interagierenden Variable.

Auf Grundlage der marginalen Effekte berechneten Glasenapp et al. (2019b) außerdem Punktelastizitäten nach Formel 12.

$$\varepsilon = \frac{\partial E(y|x)}{\partial x_p} \cdot \frac{x_p}{y_p} \quad (12)$$

y_p steht dabei für den durchschnittlichen und gewichteten Holzverbrauch (Wooldridge 2010, McDonald und Moffitt 1980). Die statistischen Berechnungen der Modellkoeffizienten, marginalen Effekte und Elastizitäten wurden mit dem Programm *R-Studios* und den zugehörigen Paketen: *Applied Econometrics with R* (Kleiber und Zeileis 2017) sowie *survreg of survival package* (Therneau und Lumley 2017, Kalbfleisch und Prentice 2002) durchgeführt.

Um Regressionsparameter erwartungstreu und effizient zu schätzen, müssen Modellannahmen erfüllt sein. Erwartungstreue bedeutet in diesem Zusammenhang, dass ein Regressionskoeffizient bei mehreren Stichprobenziehungen im Durchschnitt dem wahren aber unbekanntem Regressionskoeffizienten entspricht. Effizienz bedeutet, dass ein erwartungstreuer Regressionskoeffizient die kleinste Streuung im Vergleich zu Koeffizienten anderer Modelle aufweist (Wooldridge 2010, Auer 2013).

Damit Regressionsparameter erwartungstreu und effizient geschätzt werden können, gelten für das Tobit-Modell die Annahmen, dass der Fehlerterm (u) der latenten Variable (Formel 8) normalverteilt ist und keine heteroskedastische Verteilung der Störgrößen vorliegt. Für die Interpretation von marginalen Effekten am Mittelwert (Formel 10 und 11) sind allerdings moderate Abweichungen von den Annahmen zulässig. Die Normalverteilungsannahme wird durch ein Histogramm überprüft, das die Verteilung des Fehlerterms darstellt. Durch die Berechnung von heteroskedastisch-robusten Standardfehlern wird auf Heteroskedastizität reagiert (Wooldridge 2010, Wooldridge 2013, Kähler 2011).

Bei einer erwartungstreuen und effizienten Schätzung darf außerdem keine Endogenität vorliegen. Endogenität tritt auf, wenn der Fehlerterm mit den unabhängigen Variablen des Modells korreliert ist. Dies ist beispielsweise der Fall, wenn eine, für die Erklärung der Variationen in der Holzverwendung relevante Variable nicht im Modell enthalten und mit einer im Modell berücksichtigten Variable korreliert ist. Beim Auftreten von Endogenität ist eine richtige Interpretation der Wirkungszusammenhänge nicht mehr möglich. Um das Tobit-Modell auf Endogenität zu untersuchen, wurde ein lineares Regressionsmodell nach Formel 13 geschätzt,

$$u_{y>0} = X_{y>0}\gamma + \delta \quad (13)$$

mit γ als Vektor der Regressionskoeffizienten und δ als normalverteilter Fehlerterm (Wooldridge 2010).

Obwohl Wooldridge (2010) für das Tobit-Modell nicht explizit die Prüfung von Multikollinearität fordert, wurde diese Eigenschaft untersucht. Multikollinearität beschreibt die Korrelation einer unabhängigen Variablen eines Modells mit weiteren unabhängigen Variablen. Bei perfekter Multikollinearität sind unabhängige Variablen vollständig korreliert und die Modellschätzung ist nicht mehr möglich. Bei sehr hoher Korrelation der unabhängigen Variablen bzw. imperfekter Multikollinearität sind Modelle schätzbar. Allerdings nimmt die Genauigkeit von Aussagen zu Wirkungszusammenhängen der

betroffenen unabhängigen Variablen ab. Eine Pearson-Korrelationsmatrix wurde berechnet, um Abhängigkeiten zwischen unabhängigen Variablen darzustellen (Auer 2013, Wooldridge 2013).

Um zu prüfen, ob das gesamte Tobit-Modell einen signifikanten Erklärungsbeitrag für Variationen in der abhängigen Variable leistet, wurde ein Wald-Test berechnet. Eine signifikante Wald-Statistik legt nahe, dass das Modell einen signifikanten Beitrag zur Erklärung von Variationen in der abhängigen Variable leistet (Wooldridge 2010, Wooldridge 2013).

5.4 Ergebnisse

Für die Jahre 2005, 2010 und 2014 gaben 4.415 Haushalte an, Brennholz zu verwenden. Bei einem Konfidenzniveau von 90 % zeigten alle Haupteffekte statistisch signifikante Zusammenhänge mit dem Brennholzeinsatz in Haushalten.

Interaktionsterme zwischen den unabhängigen Variablen und der Jahresvariable waren, bei einem Signifikanzniveau von 5 %, nicht signifikant. Lediglich die Regressionskoeffizienten der Variablen Holzzentralheizung, Wohnfläche und Wohnungsart wiesen im zeitlichen Verlauf signifikante Änderungen auf. Um eine Überspezifizierung des Modells zu verhindern und effiziente Testergebnisse zu ermöglichen, wurden alle nicht-signifikanten Interaktionsterme (p -Wert $> 0,05$) aus dem Modell entfernt (Wooldridge 2010).

Außerdem waren bei einem Signifikanzniveau von 5 %, bis auf die Variable Waldbesitz, keine unabhängigen Variablen signifikant mit dem Fehlerterm korreliert. Die Variable Waldbesitz war bei einem Signifikanzniveau von 1 % nicht signifikant mit dem Fehlerterm korreliert (Anhang A.VIII). Die Ergebnisse werden als Indiz dafür gewertet, dass keine Endogenität vorliegt und Wirkungszusammenhänge korrekt dargestellt werden. Der Fehlerterm der latenten Variablen weist leichte Abweichungen von der Normalverteilungsannahme auf (Anhang A.IX), die nach Wooldridge (2010) bei der Interpretation von marginalen Effekten am Mittelwert zulässig sind. Für drei Werte der Pearson-Korrelationsmatrix wurden Korrelationen ($> \pm 0,5$) festgestellt (Anhang A.X). Regressionskoeffizienten, Standardfehler und p -Werte sowie die Wald-Statistik des Tobit-Modells sind in Tabelle 12 dargestellt.

Tabelle 12: Regressionskoeffizienten, Standardfehler und p-Werte des linkszensierten Tobit-Modells

Variablenbezeichnung	Regressionskoeffizient	Standardfehler	p-Wert
Achsenabschnitt	-16,832	5,85E+00	4,03E-03
ZH: ja	14,573	8,89E-01	1,94E-60
WF	0,023	3,82E-03	1,64E-09
FJ	-0,010	2,46E-03	2,32E-05
WA: Mieter in Mehrfamilienhaus	-4,390	1,06E+00	3,24E-05
WA: Eigentümer in Ein-/Zweifamilienhaus	7,951	8,95E-01	6,23E-19
WA: Mieter in Ein-/Zweifamilienhaus	2,881	8,89E-01	1,19E-03
AP	0,010	2,30E-03	3,20E-05
WB: ja	4,636	5,89E-01	3,38E-15
UB: 5.000 – 19.999 Einwohner	-0,752	2,81E-01	7,34E-03
UB: 20.000 – 49.999 Einwohner	-1,989	3,49E-01	1,22E-08
UB: 50.000 – 99.999 Einwohner	-3,027	4,46E-01	1,10E-11
UB: 100.000 – 499.999 Einwohner	-3,290	4,63E-01	1,25E-12
UB: ≥ 500.000 Einwohner	-3,564	5,44E-01	5,81E-11
WD	2,260	8,54E-01	8,17E-03
GT	0,003	3,61E-04	8,59E-17
ST: Westen	2,160	1,24E+00	8,15E-02
ST: Süden	5,204	1,18E+00	9,54E-06
ST: Osten	2,808	1,47E+00	5,69E-02
HG: 2 Personen	3,206	5,97E-01	7,85E-08
HG: 3 Personen	2,850	8,52E-01	8,17E-04
HG: 4 Personen	3,392	1,10E+00	2,11E-03
HG: ≥ 5 Personen	3,006	1,05E+00	4,05E-03
NE: 1.000 – 1.999 Euro	2,231	1,10E+00	4,19E-02
NE: 2.000 – 2.999 Euro	2,792	1,12E+00	1,30E-02
NE: 3.000 – 3.999 Euro	3,111	1,15E+00	6,82E-03
NE: ≥ 4.000 Euro.	4,173	1,40E+00	2,86E-03
AL	-0,055	8,16E-03	2,23E-11
WF × HG: 2 Personen	-0,015	4,40E-03	7,43E-04
WF × HG: 3 Personen	-0,010	5,91E-03	1,02E-01
WF × HG: 4 Personen	-0,007	7,53E-03	3,47E-01
WF × HG: ≥ 5 Personen	-0,004	6,66E-03	5,94E-01
ST: Westen × NE: 1.000 – 1.999 Euro	-2,779	1,34E+00	3,84E-02
ST: Süden × NE: 1.000 – 1.999 Euro	-2,893	1,25E+00	2,10E-02
ST: Osten × NE: 1.000 – 1.999 Euro	-3,101	1,66E+00	6,17E-02
ST: Westen × NE: 2.000 – 2.999 Euro	-1,641	1,33E+00	2,19E-01
ST: Süden × NE: 2.000 – 2.999 Euro	-4,080	1,28E+00	1,43E-03
ST: Osten × NE: 2.000 – 2.999 Euro	-4,416	1,67E+00	8,29E-03
ST: Westen × NE: 3.000 – 3.999 Euro	-2,266	1,36E+00	9,53E-02
ST: Süden × NE: 3.000 – 3.999 Euro	-4,248	1,31E+00	1,18E-03
ST: Osten × NE: 3.000 – 3.999 Euro	-4,546	1,84E+00	1,35E-02
ST: Westen × NE: ≥ 4.000 Euro.	-3,614	1,61E+00	2,45E-02
ST: Süden × NE: ≥ 4.000 Euro.	-6,253	1,56E+00	6,43E-05

Variablenbezeichnung	Regressions- koeffizient	Standard- fehler	p-Wert
ST: Osten × NE: ≥ 4.000 Euro.	-5,615	2,08E+00	7,00E-03
Jahr: 2010 × ZH	1,735	1,54E+00	2,60E-01
Jahr: 2014 × ZH	-2,684	1,13E+00	1,79E-02
Jahr: 2010 × WF	0,013	4,83E-03	7,38E-03
Jahr: 2014 × WF	0,014	4,20E-03	9,28E-04
Jahr: 2010 × WA: Mieter in Mehrfamilienhaus	-1,913	1,17E+00	1,01E-01
Jahr: 2010 × WA: Eigentümer in Ein- /Zweifamilienhaus	-3,172	9,32E-01	6,65E-04
Jahr: 2010 × WA: Mieter in Ein-/Zweifamilienhaus	-1,926	1,02E+00	6,01E-02
Jahr: 2014 × WA: Mieter in Mehrfamilienhaus	-1,999	1,31E+00	1,26E-01
Jahr: 2014 × WA: Eigentümer in Ein- /Zweifamilienhaus	-3,068	9,90E-01	1,95E-03
Jahr: 2014 × WA: Mieter in Ein-/Zweifamilienhaus	-1,212	1,11E+00	2,73E-01
Log(scale)	2,182	6,28E-02	5,88E-265
Waldstatistik	704,3; 53 Df	p-value: < 2,22E-16	
Anzahl der Newton-Raphson Iterationen	5		
Nennungen insgesamt	21.616		
Unzensierte Nennungen	4.415		

Quelle: Glasenapp et al. 2019b

Für die Interpretation der Wirkungszusammenhänge wurden marginale Effekte an den gewichteten Mittelwerten der Jahre 2005, 2010 und 2014, nach Formel 10 und 11, berechnet. Marginale Effekte zeigen die Wirkung von Änderungen in einer unabhängigen Variable auf den energetischen Holzeinsatz eines durchschnittlichen Haushalts an, wenn sich die übrigen Variablen nicht ändern. In Tabelle 13 sind die Ergebnisse für die marginalen Effekte dargestellt. Die Wirkungsrichtungen und Größenordnungen der Effekte in den Jahren 2005, 2010 und 2014 sind für die jeweiligen Variablen konsistent. Außerdem werden die meisten Hypothesen zu den Wirkungsrichtungen aus Kapitel 5.1 bestätigt.

Tabelle 13: Marginale Effekte zu den jährlichen Mittelwerten der Jahre 2005, 2010 und 2014

Variablenbezeichnung	2005	2010	2014
<i>Wohnungseigenschaften</i>			
Holzzentralheizung: ja	0,83	1,82	1,01
Wohnfläche	0,0009	0,0032	0,0025
Fertigstellungsjahr	-0,0006	-0,0012	-0,0009
Wohnungsart: Mieter in Mehrfamilienhaus	-0,25	-0,70	-0,54
Wohnungsart: Eigentümer in Ein-/Zweifamilienhaus	0,46	0,53	0,41
Wohnungsart: Mieter in Ein-/Zweifamilienhaus	0,17	0,11	0,14
Preise für alternative Energieträger	0,0005	0,0011	0,0008
<i>Umwelteinfluss</i>			
Waldbesitzer: ja	0,27	0,52	0,39
Urbanisierungsgrad: 5.000 – 19.999 Einwohner	-0,04	-0,08	-0,06
Urbanisierungsgrad: 20.000 – 49.999 Einwohner	-0,11	-0,22	-0,17
Urbanisierungsgrad: 50.000 – 99.999 Einwohner	-0,17	-0,34	-0,26
Urbanisierungsgrad: 100.000 – 499.999 Einwohner	-0,19	-0,37	-0,28
Urbanisierungsgrad: ≥ 500.000 Einwohner	-0,20	-0,40	-0,30
Walddichte	0,13	0,25	0,19
Heizgradtage	0,0002	0,0003	0,0003
Standort: Westen	0,0032	0,0025	0,0032
Standort: Süden	0,1116	0,2006	0,1527
Standort: Osten	-0,0371	-0,0852	-0,0646
<i>Soziodemografische Eigenschaften</i>			
Haushaltsgröße: 2 Personen	0,09	0,19	0,15
Haushaltsgröße: 3 Personen	0,10	0,21	0,16
Haushaltsgröße: 4 Personen	0,15	0,30	0,23
Haushaltsgröße: ≥ 5 Personen	0,15	0,30	0,22
Nettoeinkommen: 1.000 – 1.999 Euro	-0,0076	-0,0151	-0,0111
Nettoeinkommen: 2.000 – 2.999 Euro	0,0144	0,0257	0,0199
Nettoeinkommen: 3.000 – 3.999 Euro	0,0161	0,0292	0,0226
Nettoeinkommen: ≥ 4.000 Euro	0,0069	0,0109	0,0083
Alter	-0,0031	-0,0061	-0,0046

Quelle: Glasenapp et al. 2019b

Haushalte mit Holzzentralheizungen gaben im betrachteten Zeitraum die höchsten Holzeinsätze (0,83 bis 1,82 m³ pro Jahr) an und wiesen damit die stärksten Effekte unter den kategorialen Variablen auf. Außerdem konnte gezeigt werden, dass der energetische Holzeinsatz mit der Wohnfläche zunimmt und ältere Gebäude im Vergleich zu neueren Gebäuden einen höheren energetischen Holzeinsatz aufwiesen. Bei Betrachtung der Wohnungsart wird deutlich, dass der energetische Holzeinsatz in Ein- und Zweifamilienhäusern höher war als bei Wohnungen in Mehrfamilienhäusern. Preisanstiege bei alternativen Energieträgern waren positiv mit der energetischen Holzverwendung korreliert. Die Ergebnisse legen nahe, dass der durchschnittliche Holzverbrauch im Haushaltssektor um 0,05 bis 0,11 m³ ansteigt, wenn die Preise für alternative Energieträger um 100 \$US/t ROE zunehmen.

Haushalte mit Waldbesitz verwendeten 0,27 bis 0,52 m³ mehr Brennholz als Haushalte ohne Waldbesitz. Bei Betrachtung des Einflusses des Urbanisierungsgrads zeigt sich, dass die energetische Holzverwendung in ländlichen Regionen am höchsten war und mit zunehmender Urbanisierung sukzessive abnahm. Auch bei der Walddichte ist zu sehen, dass Haushalte in Gebieten mit hoher Walddichte zu einem höheren Holzverbrauch tendierten (0,13 bis 0,25 m³ pro Änderung in der Walddichte). Das positive Vorzeichen der marginalen Effekte für Heizgradtage bedeutet, dass der Holzverbrauch bei niedrigeren Temperaturen erwartungsgemäß zunahm. Außerdem suggerieren Ergebnisse zum Standort, dass süddeutsche Haushalte die höchsten Holzverbräuche aufwiesen.

Signifikante Regressionskoeffizienten und marginale Effekte belegen, dass auch sozioökonomische Variablen signifikant mit dem energetischen Holzeinsatz assoziiert waren. Haushalte mit 5 oder mehr Bewohnern wiesen einen höheren energetischen Holzeinsatz (0,15 bis 0,30 m³) auf als Ein-Personen-Haushalt. Außerdem hatten Haushalte mit niedrigem Einkommen (≤ 2.000 Euro) ein geringes Verbrauchsniveau von Brennholz. Das Alter des Haushaltsvorstandes war negativ mit der energetischen Holzverwendung korreliert.

Für ausgewählte Variablen wurden Punktelastizitäten nach Formel 12 berechnet und sind in Tabelle 14 dargestellt. Der energetische Holzeinsatz verhält sich elastisch zu Änderungen im Fertigstellungsjahr eines Gebäudes. Dies ähnelt dem Verhalten bei Preisänderungen für alternative Energieträger und Änderungen der Heizgradtage in den Jahren 2010 und 2014. Bezüglich Änderungen in der Wohnfläche und Walddichte erwies sich der energetische Holzeinsatz als unelastisch.

Tabelle 14: Punktelastizitäten ausgewählter Variablen

Variablenbezeichnung	2005	2010	2014
Wohnfläche	0,128	0,269	0,321
Fertigstellungsjahr	-1,564	-1,906	-2,202
Preise für alternative Energieträger	0,653	1,024	1,362
Walddichte	0,043	0,053	0,062
Heizgradtage	0,832	1,149	1,010

Quelle: Glasenapp et al. 2019b

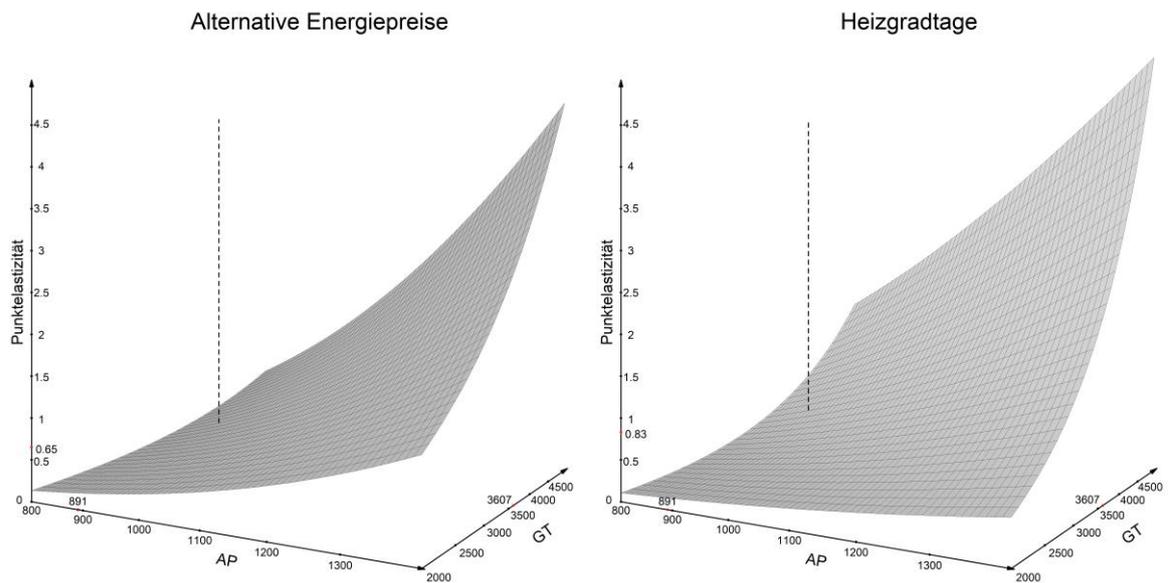
Aufgrund des zunehmend elastischen Verhaltens des Holzverbrauchs bezüglich Änderungen in Preisen für alternative Energieträger und Heizgradtagen sowie den deutlichen jährlichen Schwankungen, wurden die Punktelastizitäten für alternative Energiepreise und Heizgradtage genauer untersucht. Abbildung 17 veranschaulicht die Punktelastizitäten in den drei Erfassungsjahren, unter Berücksichtigung von Veränderungen in den Preisen für alternative Energieträger und Heizgradtagen sowie bei konstanten jährlichen Mittelwerten der übrigen Variablen und des jeweiligen durchschnittlichen Holzeinsatzes. Die gestrichelten Linien repräsentieren die Position der Mittelwerte im jeweiligen Erfassungsjahr.

Aus den Flächen lassen sich Punktelastizitäten ablesen, die berechnet worden wären, wenn die Variablen für alternative Energiepreise oder Heizgradtage in den Jahren 2005, 2010 oder 2014 andere Werte angenommen hätten. Die Angaben sind als theoretische

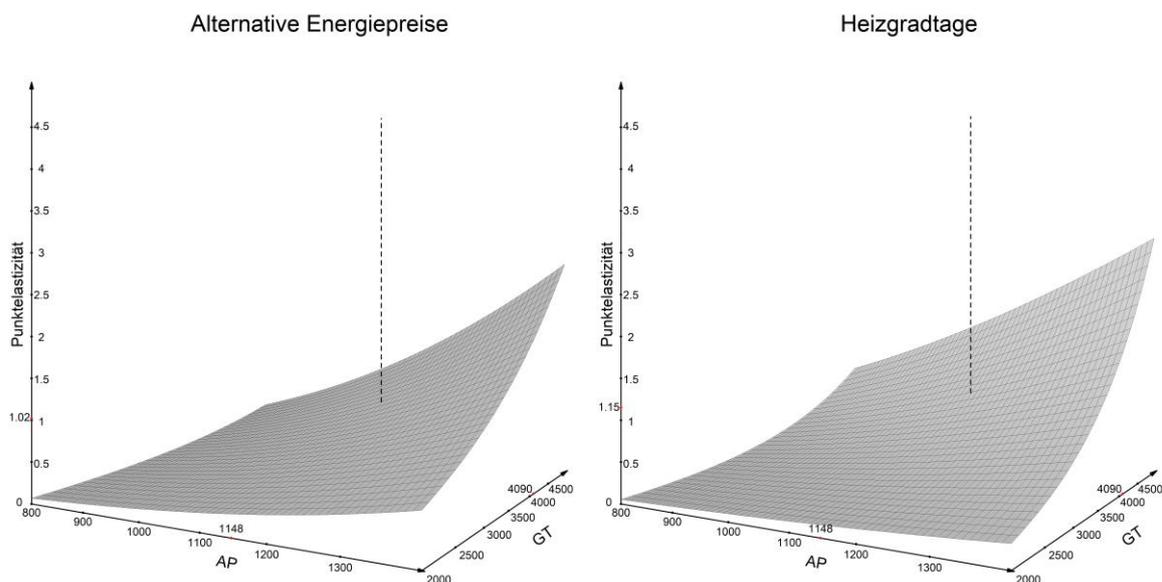
Werte zu verstehen, die zeigen, dass sich die Punktelastizitäten bei Änderungen der Temperatur und des Energiepreises deutlich verändern können.

Mit steigenden Werten für alternative Energiepreise und Heizgradtage nehmen die Punktelastizitäten in einem nichtlinearen Verlauf zu. Der nichtlineare Verlauf ist auf die Spezifikation des Tobit-Modells und die Zensur von Werten kleiner Null zurückzuführen (Wooldridge 2010). Unterschiede in der Ausprägung der Flächen je nach Erfassungsjahr resultieren aus unterschiedlichen, jährlichen Mittelwerten im Holzeinsatz sowie Änderungen der indirekten Effekte (Formel 10).

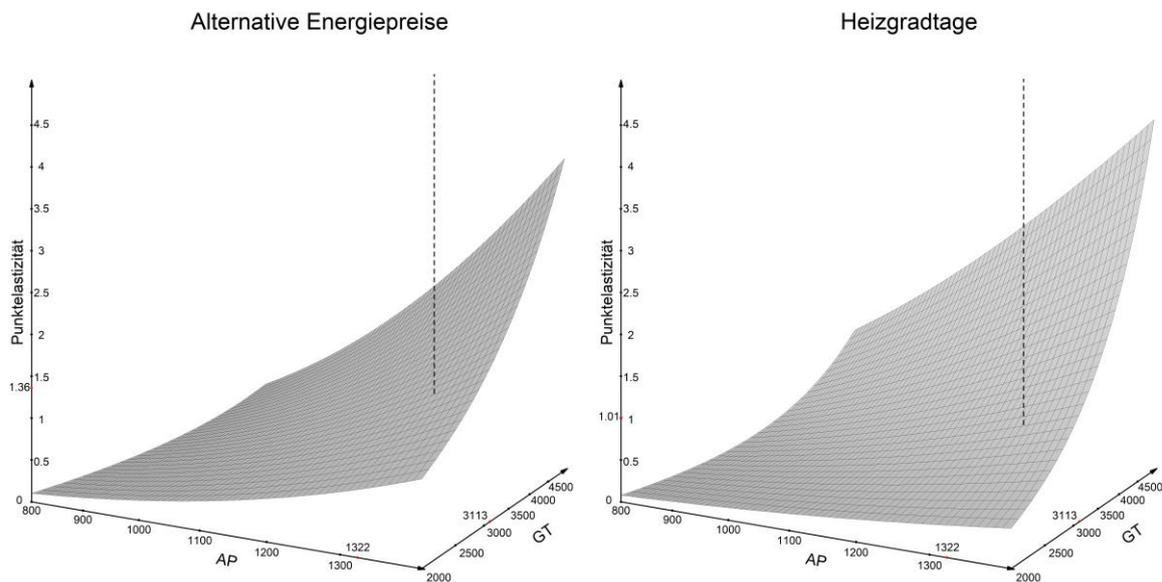
a) Punktelastizitäten bei flexiblen Werten für alternative Energiepreise (AP) und Heizgradtage (GT) sowie konstanten, gewichteten Mittelwerten der übrigen Variablen im Jahr 2005. Die vertikale gestrichelte Linie repräsentiert die Position der gewichteten Mittelwerte für AP und GT im Jahr 2005.



b) Punktelastizitäten bei flexiblen Werten für alternative Energiepreise (AP) und Heizgradtage (GT) sowie konstanten, gewichteten Mittelwerten der übrigen Variablen im Jahr 2010. Die vertikale gestrichelte Linie repräsentiert die Position der gewichteten Mittelwerte für AP und GT im Jahr 2010.



c) Punktelastizitäten bei flexiblen Werten für alternative Energiepreise (AP) und Heizgradtage (GT) sowie konstanten, gewichteten Mittelwerten der übrigen Variablen im Jahr 2014. Die vertikale gestrichelte Linie repräsentiert die Position der gewichteten Mittelwerte für AP und GT im Jahr 2014.



Quelle: Glasenapp et al. 2019b

Abbildung 17: Punktelastizitäten für alternative Energiepreise und Gradtagzahlen

5.5 Diskussion

Die Ergebnisse zum durchschnittlichen, energetischen Holzverbrauch ähneln den Angaben für Deutschland und aus anderen Ländern. In Deutschland wurde der energetische Holzeinsatz in Haushalten im Jahr 2005 je nach Studie mit 20,7 bis 25,8 Mio. m³ Holz angegeben. Dies entspricht einem durchschnittlichen Verbrauch von 0,58 bis 0,72 m³ pro Haushalt (Mantau und Sörgel 2006, Frondel et al. 2007, Mikrozensus 2008) und stimmt, bei einem Signifikanzniveau von 5 %, mit dem Stichprobenwert dieser Arbeit (0,75 ±0,07 m³) überein. Im Jahr 2010 lag der durchschnittliche Holzverbrauch bei 1,19 ±0,13 m³, was im Vergleich zu anderen Ergebnissen (0,80 bis 0,94 m³) einen höheren Wert darstellt. Unterschiede sind durch eine andere Handhabung von Extremwerten zu erklären (Mantau 2012, Mikrozensus 2012, Frondel et al. 2013). Für das Jahr 2014 wurde ein durchschnittlicher Holzverbrauch von 0,76 m³ angegeben, was dem Wert aus der Stichprobe dieser Arbeit (0,79 ±0,07 m³) ähnelt. Durchschnittswerte für den jährlichen Holzverbrauch in den USA und der französischen Region Midi-Pyrénées wurden mit 0,5 m³ (Song et al. 2012) und 3,3 m³ angegeben. Die höheren Angaben für Haushalte aus den Midi-Pyrénées ergeben sich aus einem höheren Anteil an Brennholznutzern im Wohnungsbestand (46 %) (Couture et al. 2012).

Die Modellergebnisse bestätigen, dass der energetische Holzeinsatz im deutschen Haushaltssektor mit einer Vielzahl an Variablen signifikant korreliert war. Wie zu erwarten war, hatten Holzzentralheizungen mit zusätzlichen 0,83 bis 1,82 m³ Holzeinsatz pro Jahr im Vergleich zu anderen kategorialen Variablen, den stärksten Einfluss auf die energetische Holzverwendung im Haushaltssektor. Die Ergebnisse ähneln den Angaben für Haushalte, die Holz als Primärenergieträger in der französischen Region Midi-Pyrénées nutzten (Couture et al. 2012). Jährliche Schwankungen in den marginalen Effekten sind auf strukturelle Veränderungen im Heizungsbestand und Effizienzsteigerungen in Holzzentralheizungen zurückzuführen. Ab dem Jahr 2000 forcierte das Marktanreizprogramm durch Investitionshilfen den Zubau von Holzzentralheizungen, was den steigenden Anteil an Holzzentralheizungen im Wohnungsbestand erklärt (BMF 2019, BMWi 2018b). Die Zunahme an Holzzentralheizungen im Anlagenbestand führt zu einem stärkeren Beitrag dieser Anlagengruppe zur energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor und kann den allgemeinen Anstieg der marginalen Effekte im Zeitraum von 2005 bis 2014 begründen. Zusätzlich zu Änderungen im Heizungsbestand, belegen signifikante Interaktionsterme mit dem Jahr 2014 (Jahr: 2014 × ZH: -2,7, vgl. Tabelle 12), dass der positive Effekt von Holzzentralheizungen (ZH = 1: 14,6, vgl. Tabelle 12) im Zeitraum von 2005 bis 2014 zurückging. Die zeitliche Änderung des Regressionskoeffizienten kann durch Effizienzsteigerungen in Holzzentralheizungen erklärt werden, wie sie auch von Kemmler et al. (2017) festgestellt wurden. Der allgemeine Anstieg der marginalen Effekte zeigt allerdings, dass die Zunahme der Holzzentralheizungen im Anlagenbestand den Effekt der Effizienzsteigerung überwiegt. Die Ergebnisse sind ein Indiz dafür, dass Investitionshilfen für Holzzentralheizungen die energetische Holzverwendung fördern können.

Änderungen in der Wohnfläche waren positiv mit dem energetischen Holzeinsatz korreliert, was auch für andere Länder gilt (Vaage 2000, Arabatzis und Malesios 2011, Tonn und White 1988, Song et al. 2012). Signifikante Interaktionsterme zwischen den Variablen Erfassungsjahr und Wohnfläche legen nahe, dass der positive Effekt in den Jahren 2005 bis 2014 kontinuierlich zunahm. Der Anstieg wird durch Veränderungen im

Verbraucherverhalten erklärt, das auf den Rückgang der durchschnittlichen Wohnfläche und dem höheren Energieverbrauch pro Fläche in kleineren Wohnungen zurückzuführen ist (Pardo et al. 2012). Der niedrigere Holzeinsatz in neueren Gebäuden wird mit einer besseren Gebäudedämmung begründet, die in Deutschland bei Neubauten vorgeschrieben ist (BMJV 2013, Glasenapp et al. 2019b). Andere potenzielle Gründe, wie z. B. eine Änderung im Verbraucherverhalten und der Einfluss von Änderungen im Verbraucherverhalten auf andere unabhängige Variablen, konnten aus den bestehenden Daten nicht abgeleitet werden und bleiben Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeiten.

Preise für alternative Energieträger (z. B. Gas, Öl und Strom) waren positiv mit der energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor korreliert. Dieses Verhalten stimmt mit Ergebnissen aus Jochem et al. (2015) überein. Für die USA wurde bei einem Anstieg der alternativen Energiepreise um 1 % eine Veränderung des Holzeinsatzes von 1,55 % festgestellt, was den 1,36 % im Jahr 2014 für Deutschland ähnelt (Song et al. 2012). Im zeitlichen Verlauf entwickelt sich das Verhältnis von Preisen und Brennholzeinsatz zunehmend elastisch. Die Preise für alternative Energieträger stiegen im Zeitraum von 2005 bis 2014 kontinuierlich an, was die zunehmend elastische Reaktion des Holzeinsatzes erklärt. Abbildung 17 zeigt außerdem, dass die Punkt Elastizitäten bei höheren Preisen noch elastischer ausgefallen wären. Die Ergebnisse zum Verbraucherverhalten bei Preisänderungen weisen darauf hin, dass die Stärkung der Konkurrenzfähigkeit der Brennholznutzung gegenüber der Verwendung von alternativen Energieträgern, z. B. durch eine höhere Besteuerung von fossilen Energieträgern, den energetischen Holzeinsatz im Haushaltssektor steigern kann. Dies wird auch für Märkte in den USA, Finnland und Schweden bestätigt (Ericsson et al. 2004, Song et al. 2012).

Ein guter Zugang zu Holzrohstoffen kann die Verwendung von Brennholz in Haushalten erhöhen. Dies lassen Ergebnisse für die Variablen Walddichte, Urbanisierungsgrad und Waldbesitz vermuten. Haushalte in Regionen mit hoher Walddichte hatten signifikant höhere Holzverbräuche als Haushalte aus Regionen mit geringer Walddichte. Ähnliches gilt für den Urbanisierungsgrad. Haushalte in ländlichen Regionen wiesen einen höheren Holzverbrauch auf als Haushalte in urbanen Regionen. Die Ergebnisse ähneln den Angaben für den US-amerikanischen Haushaltssektor (Song et al. 2012). Ein höherer Holzeinsatz in ländlichen Regionen kann dabei auf eine bessere Rohstoffverfügbarkeit, beispielsweise durch mehr landwirtschaftlich genutzte Flächen, Gärten oder ausreichend Fläche für die Holzlagerung, hinweisen. Der Rückgang der Landbevölkerung in Deutschland lässt einen Rückgang der energetischen Holznutzung im Haushaltssektor vermuten (StBa 2016). Dieser Entwicklung könnte beispielsweise durch eine verbesserte Infrastruktur des Holzmarkts entgegengewirkt werden (Egger et al. 2014). Der Waldbesitz ist eine weitere Variable, die im Zusammenhang mit der Rohstoffverfügbarkeit steht. Der energetische Holzeinsatz von Haushalten mit Waldbesitz war in allen Erfassungsjahren höher als von Haushalten ohne Waldbesitz. Waldbesitzer leben überwiegend in ländlichen Regionen (Schraml und Hårdter 2002). In Zukunft könnte sich der Anteil an Waldbesitzern in urbanen Regionen durch Erbfälle erhöhen und als Folge der energetische Holzeinsatz in diesen Regionen steigen. Neben dem Zugang zu Holzbrennstoffen scheint auch die Einstellung zum Rohstoff Holz die Brennholzverwendung zu beeinflussen. Filippi (2013) wiesen auf die positive Einstellung zur materiellen Holznutzung in Süddeutschland hin. Aufgrund des höheren Brennholzeinsatzes in süddeutschen Haushalten ist davon auszugehen, dass diese Aussage auch für die energetische Holznutzung gilt. Außerdem sind

die Ergebnisse ein Indiz dafür, dass die bayrische Landesregierung die energetische Holznutzung, wie im Energiekonzept beschrieben, stärker fördert als andere Bundesländer (BSR 2011).

Heizgradtage waren positiv mit dem Holzeinsatz korreliert, was Ergebnisse aus Jochem et al. (2015) bestätigt und den Ergebnissen für andere Länder ähnelt (Vaage 2000, Song et al. 2012). Im zeitlichen Verlauf fällt auf, dass der energetische Holzeinsatz im Jahr 2005 unelastisch und in den Jahren 2010 und 2014 elastisch auf Änderungen in den Heizgradtagen reagierte. Abbildung 17 ist zu entnehmen, dass die gewichteten Mittelwerte für Heizgradtage im Jahr 2010 am niedrigsten (3.113 °C) und im Jahr 2014 am höchsten (4.090 °C) waren. Im Jahr 2005 lag der gewichtete Mittelwert für Heizgradtage bei 3.607 °C. Es ist davon auszugehen, dass die energetische Holzverwendung im Haushaltssektor bei kälteren Temperaturen zunimmt (Abbildung 17). Dieser Theorie widerspricht allerdings das, im Vergleich zum Jahr 2005, elastischere Verhalten der Brennholznutzung im Jahr 2014, bei zeitgleich niedrigsten, gewichteten Mittelwerten für Heizgradtage. Der Widerspruch lässt sich durch strukturelle Änderungen im Haushaltssektor (z. B. einen höheren Anteil an Holzzentralheizungen) und höhere Preise für alternative Energieträger erklären, die zu mehr Brennholznutzern im Jahr 2014 führten. Der höhere Anteil an Brennholznutzern im Jahr 2014 begründet den, im Vergleich zum Jahr 2005, stärkeren Einfluss von Änderungen in Heizgradtagen auf die durchschnittliche Holzverwendung.

Ergebnisse zum monatlichen Haushaltseinkommen legen nahe, dass im gesamten Haushaltssektor Haushalte der mittleren Einkommenskategorie (1.000 – 1.999 Euro) weniger Holzenergie verwendeten als Haushalte der unteren und oberen Einkommenskategorien. Darüber hinaus verwendeten Haushalte der oberen Einkommenskategorien das meiste Brennholz. Der höhere Holzverbrauch in Haushalten der oberen Einkommensschicht ist auf das überrepräsentative Vorkommen von Brennholznutzer in diesen Einkommenskategorien zurückzuführen (Kapitel 5.2.3). Die Ergebnisse ähneln denen für die USA mit dem Unterschied, dass sie nicht nur für den urbanen Wohnungsbestand, sondern für den gesamten deutsche Haushaltssektor gelten (Song et al. 2012). Somit kann die Hypothese (vgl. Kapitel 5.1), dass Haushalte der unteren Einkommenskategorie Brennholz zur Kostenminimierung nutzen, für Deutschland nur teilweise bestätigt werden (Arabatzis und Malesios 2011, Couture et al. 2012). Vielmehr weist Brennholz, durch die vermehrte Nutzung in Haushalten der oberen Einkommenskategorien, Eigenschaften eines Luxusgutes auf.

Die Ergebnisse der Analyse liefern Hinweise auf Maßnahmen mit denen auf die zukünftige Entwicklung des energetischen Holzeinsatzes im Haushaltssektor eingewirkt werden kann. In diesem Zusammenhang stellt die Schaffung von Investitionsanreizen für Holzzentralheizungen eine Maßnahme dar mit der die effiziente Brennholznutzung gefördert werden kann. Auch die Verbesserung der Konkurrenzfähigkeit von Holzenergie gegenüber alternativen Energieträgern oder ein besserer Zugang zu Holzrohstoffen kann sich positiv auf die energetische Holznutzung im Haushaltssektor auswirken.

Bei möglichen Eingriffen in den Markt und der Förderung der energetischen Holznutzung sind allerdings positive und negative Effekt gegeneinander abzuwägen. Der erneuerbare Energieträger Holz kann beispielsweise einen Beitrag zur Minderung klimaschädlicher Emissionen leisten, wenn fossile Energieträger durch Holz ersetzt werden. Außerdem

kann der Bezug von Brennholz aus regionalen Wäldern die Importabhängigkeit des Energiesektors reduzieren oder Impulse für die Entwicklung ländlicher Räume geben (Kapitel 4, Asikainen und Aguilar 2018, Lippke et al. 2012, Söderberg und Eckerberg 2013). Die Förderung der energetischen Holznutzung kann allerdings auch zu Marktverzerrungen führen oder der Umwelt, z. B. der nachhaltigen Waldbewirtschaftung oder Luftqualität, schaden (Kapitel 4, Glasenapp und McCusker 2018, Söderberg und Eckerberg 2013, Scarlat et al. 2015, Asikainen und Aguilar 2018). Die Bundes-Immissionsschutz-Verordnung (BImSchV) stellt eine Reaktion auf die Schadstoffemissionen von Holzfeuerungsanlagen dar (BMJV 2019). Durch die sukzessive Erhöhung der Emissionsgrenzwerte konnte der Feinstaubausstoß von Holzfeuerungsanlagen gemindert werden (ZIV 2017).

Trotz möglicher negativer Effekte ist Brennholz derzeit, wie in Kapitel 4 beschrieben, ein wichtiger Bestandteil der erneuerbaren Energien. Vor dem Hintergrund der Ausbauziele für erneuerbare Energien, bieten die Ergebnisse wichtige Erkenntnisse, um auf die zukünftige Entwicklung der energetischen Holznutzung im Haushaltssektor zielgerichtet Einfluss nehmen zu können.

6 Statistiken zur energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor der EU28-Mitgliedsländer

Die Verwendung von Holzenergie wird in den internationalen Berichterstattungen für die Energiestatistik sowie Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft erfasst. Mantau et al. (2017), Glasenapp und McCusker (2018) und Glasenapp und Weimar (2019) haben sich mit den relevanten Berichterstattungen befasst. Im Folgenden wird auf die Zusammenhänge der Berichtssysteme eingegangen, der geografische Bezug mit Fokus auf die 28 Mitgliedsländer der Europäischen Union (EU28¹⁷) dargestellt und die Datenlage zur energetischen Holznutzung im Haushaltssektor beschrieben und diskutiert.

Wie in Abbildung 18 dargestellt, umfasst die Energiestatistik die Berichterstattungen von IEA/Eurostat/UNECE, IRENA und UNSD. Bei der Statistik der Forst- und Holzwirtschaft sammeln UNECE/FAO/ITTO Informationen über Holzsortimente in der ECE Region¹⁸, inklusive der Mitgliedsländer der EU28. Außerdem unterhält UNECE/FAO ein Netzwerk an nationalen Korrespondenten, um mit dem Joint Wood Energy Enquiry (JWEE) detaillierte Informationen zur energetischen Verwendung von Holzsortimenten zu ermitteln. Die Berichterstattungen unterscheiden sich im Detailgrad der erfassten Holzsortimente und Verwendungssektoren. Energiestatistiken sind sehr detailliert in der Differenzierung von Verwendungssektoren (z. B. Umwandlungs-, Industrie- und Haushaltssektor), während Holzsortimente weniger genau erfasst werden. In den Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft verhält sich dies umgekehrt (Glasenapp und McCusker 2018, Glasenapp und Weimar 2019).

¹⁷ EU28 umfasst folgende Mitgliedsländer: Belgien, Bulgarien, Dänemark, Deutschland, Estland, Finnland, Frankreich, Griechenland, Irland, Italien, Kroatien, Lettland, Litauen, Luxemburg, Malta, Niederlande, Österreich, Polen, Portugal, Rumänien, Schweden, Slowakei, Slowenien, Spanien, Tschechien, Ungarn, Vereinigtes Königreich und Zypern

¹⁸ Die ECE Region umfasst alle Mitgliedsländer der Vereinten Nationen, Wirtschaftskommission für Europa bzw. Länder der nördlichen Hemisphäre.

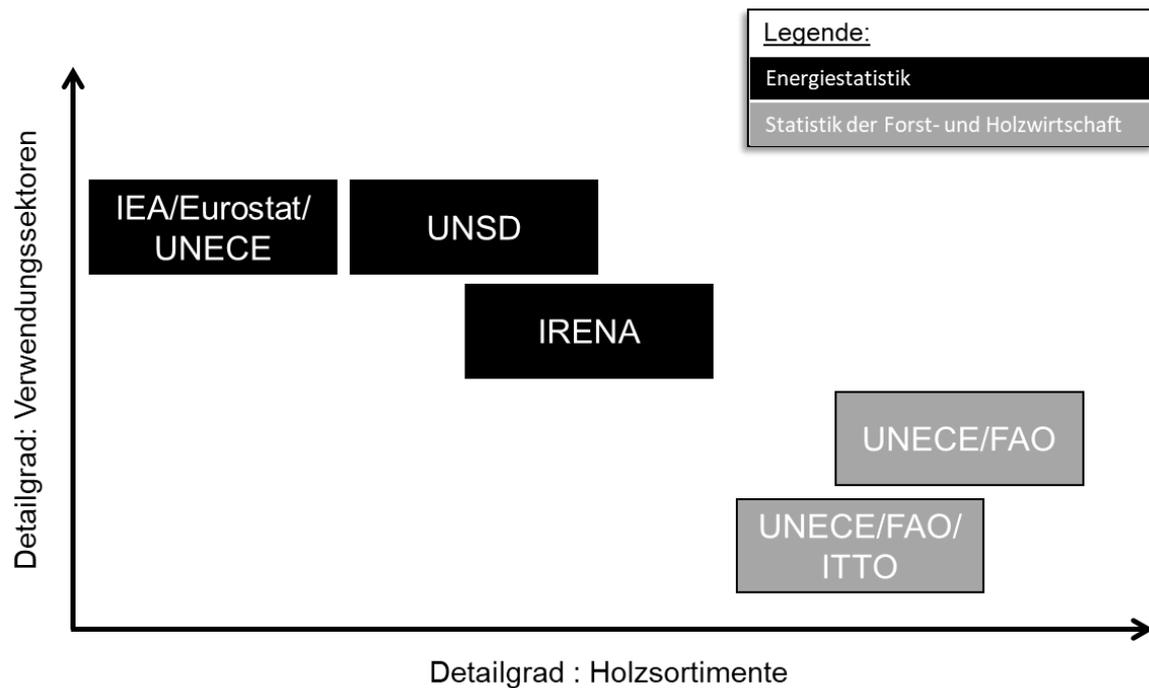


Abbildung 18: Internationale Berichterstattungen mit Bezug zur energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor

An dieser Stelle soll außerdem auf die Berichterstattung der europäischen Kommission hingewiesen werden, mit der der Ausbau von erneuerbaren Energien in der EU28 überwacht wird. Im Gegensatz zu den anderen Berichterstattungen erfasst die europäische Kommission das inländische Biomasseaufkommen sowie den Handel von Holzsortimenten zur Energieerzeugung und nicht den Energieverbrauch.

In den Kapiteln 6.1 bis 6.6 wird näher auf die Berichterstattungen eingegangen. Im Anschluss werden die, für den Haushaltssektor zur Verfügung stehenden Daten in Kapitel 6.7 und 6.8 verglichen und diskutiert.

6.1 IEA/Eurostat/UNECE: Fragebogen zu erneuerbaren Energien und Abfällen

Die Internationale Energie Agentur (IEA), Eurostat und die Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE) erstellen jedes Jahr Energiebilanzen für die Mitgliedsländer der OECD sowie für einige Nicht-OECD-Länder (Glasenapp und McCusker 2018, Glasenapp und Weimar 2019, IEA 2019a). Für Mitgliedsländer der EU28 sind die Daten bei Eurostat¹⁹ veröffentlicht und frei zugänglich. Holzenergie wird im Fragebogen für erneuerbare Energien und Abfälle berücksichtigt. Der Fragebogen unterscheidet zwischen der Produktion sowie dem Handel und Verbrauch von Energieträgern (IEA 2019a).

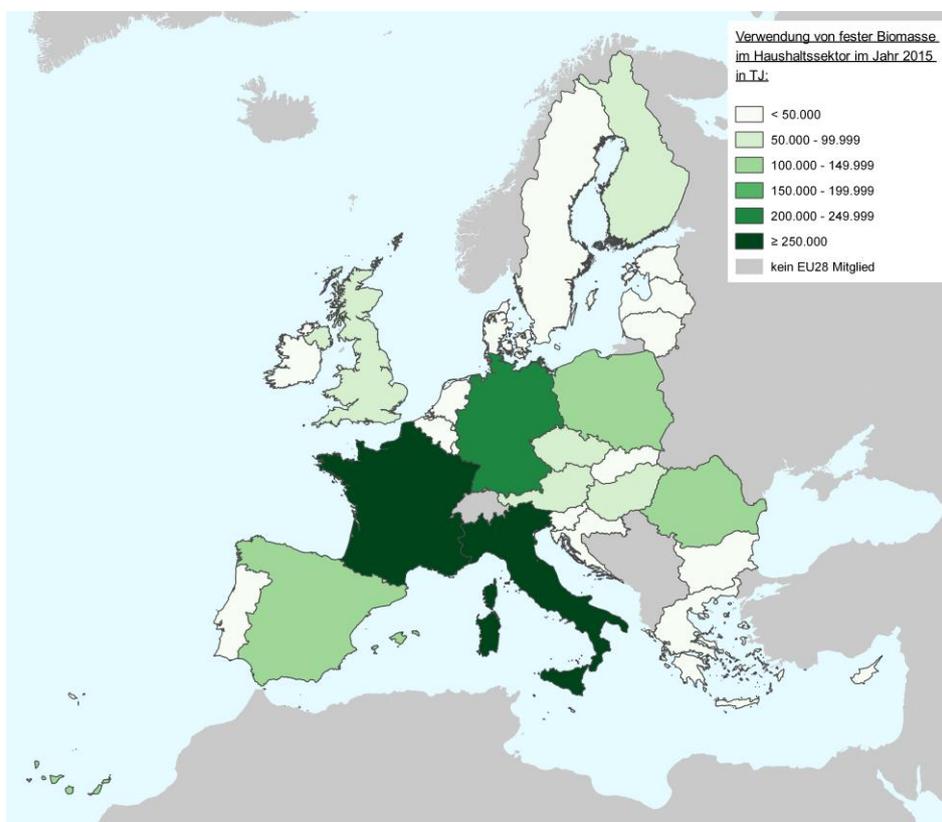
Bei Angaben zur Produktion wird feste Biomasse (ohne Holzkohle) getrennt nach Brennholz (inkl. Scheitholz, Restholz etc.), Schwarzlauge, Bagasse, tierische Abfälle sowie andere pflanzliche Materialien und Reststoffe erfasst. Außerdem wird der in der Brennholzproduktion enthaltene Anteil an Holzpellets ausgewiesen. In den Handelsdaten

¹⁹ Eurostat, Versorgung, Umwandlung, Verbrauch - erneuerbare Energien - jährliche Daten: <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>

findet Holz ausschließlich im Im- und Export von Holzpellets Berücksichtigung (IEA 2019a).

Der Brennholzverbrauch wird im Fragebogen von IEA/Eurostat/UNECE als feste Biomasse (ohne Holzkohle) erfasst. Feste Biomasse enthält neben Holz (z. B. Scheitholz, Holzpellets, Schwarzlauge) auch sonstige Biomasse, wie z. B. tierische Abfälle oder andere pflanzliche Materialien und Reststoffe. Der Holzkohleeinsatz wird separat angegeben. Sektoren, in denen Energieträger verwendet werden, werden sehr differenziert erfasst. Umwandlungssektor, Energiesektor und Endenergieverbrauch bilden die drei Hauptsektoren, denen jeweils 14, 11 und 22 Untersektoren angehören. Der Haushaltssektor zählt zu den Endenergieverbrauchern. Alle Energiemengen sind in Energieeinheiten des Heizwerts angegeben (IEA 2019a, IEA 2019b).

In Abbildung 19 ist die geografische Verteilung der energetischen Verwendung von fester Biomasse (ohne Holzkohle) in den Haushaltssektoren der EU28 im Jahr 2015 dargestellt. Haushalte in Frankreich und Italien hatten mit 271 bzw. 266 PJ den höchsten Einsatz von fester Biomasse, gefolgt von Deutschland mit 223 PJ. Es erstaunt der geringe absolute Holzverbrauch in den skandinavischen Ländern. Obwohl der Pro-Kopf-Verbrauch in skandinavischen Ländern, neben dem der baltischen und südosteuropäischen Ländern, einer der höchsten in Europa ist, ist der absolute Holzeinsatz aufgrund der kleinen Einwohnerzahl geringer als in den übrigen Ländern der EU28 (Glasenapp et al. 2019a, Eurostat 2019b). Informationen zur Verwendung einzelner Holzsortimente (z. B. Derbholz, Restholz und Gebrauchtholz) werden von IEA/Eurostat/UNECE nicht erfasst.



Quellen: Eurostat 2019b

Abbildung 19: Absoluter Einsatz fester Biomasse (ohne Holzkohle) im Haushaltssektor der EU28-Mitgliedsländer im Jahr 2015

6.2 IRENA: Fragebogen zur Erneuerbare Energien Statistik

Die Internationale Agentur für Erneuerbare Energien (IRENA) erstellt Energiebilanzen zu erneuerbaren Energien für Länder der gesamten Welt. Für afrikanische und asiatische Länder weist der Datensatz allerdings Lücken auf. Aggregierte Informationen zu erneuerbaren Energien sind in Jahresberichten²⁰ veröffentlicht und frei verfügbar (IRENA 2018).

Im Fragebogen wird die Produktion, Handel und Verbrauch von Energieträgern nach dem Schema einer Energiebilanz erfasst. Energiemengen werden in Energieeinheiten des Heizwerts angegeben. In der Befragung kann Holzenergie als Scheitholz, Gebrauchtholz und Schwarzlaube sowie Biomassepellets oder –briketts (inkl. Biomasse aus Nussschalen oder Olivenkernen) angegeben werden (Glaserapp und McCusker 2018, IRENA 2018).

Aus der Produktion, dem Handel und Lagerbestandsänderungen wird das inländische Aufkommen von erneuerbaren Energieträgern berechnet. Die Verbrauchsangaben unterscheiden zwischen dem Einsatz von Energieträgern in Umwandlungsprozessen und beim Endnutzer. Umwandlungsprozesse umfassen Prozesse, in denen Primär- und Sekundärenergieträger zu Energieträgern für den Endverbrauch hergestellt werden. Dies betrifft insbesondere die Strom- und Wärmeherzeugung in Kraftwerken (z. B. Anlagen mit Kraft-Wärme-Kopplung) und die Herstellung von Holzkohle. Beim Endenergieverbrauch werden Energieträger in Nutzenenergie (z. B. Wärme, Licht, mechanische Energie) umgewandelt. IRENA unterscheidet bei den Endverbrauchern den Industrie-, Transport-, Haushalts-, kommerziellen und öffentlichen Sektor sowie sonstige Verbraucher (Ströbele et al. 2012, IRENA 2018).

Bei fehlenden Länderangaben werden Datenlücken durch Informationen aus offiziellen und nicht offiziellen Veröffentlichungen geschlossen. In Tabelle 15 ist die Verwendung von fester Biomasse im Haushaltssektor und der Anteil an Pellets angegeben. Eine weitere Differenzierung von fester Biomasse in Scheitholz und Gebrauchtholz ist aufgrund der Ergebnisdarstellung in IRENA (2018) nicht möglich. Die Länder mit dem größten Holzeinsatz waren Frankreich (271 PJ), Italien (266 PJ) und Deutschland (223 PJ). Der Anteil an Pellets ist für 15 Länder bekannt. In Belgien, Dänemark, Luxemburg, Malta und Niederlanden entfielen mehr als 25 % des Einsatzes von fester Biomasse in Haushalten auf Pellets (IRENA 2018).

Tabelle 15: Einsatz fester Biomasse (ohne Holzkohle) in TJ in den Haushaltssektoren der EU28-Mitgliedsländer im Jahr 2015

Land	Feste Biomasse in TJ	davon Pellets in %
Belgien	22.389	35
Bulgarien	29.982	9
Dänemark	40.312	32
Deutschland	222.600	n.a.
Estland	15.133	n.a.
Finnland	50.037	10
Frankreich	270.614	n.a.
Griechenland	32.831	n.a.

²⁰ IRENA, Renewable Energy Statistics 2019: <https://irena.org/publications/2019/Jul/Renewable-energy-statistics-2019>

Land	Feste Biomasse in TJ	davon Pellets in %
Irland	1.355	n.a.
Italien	265.926	20
Kroatien	48.446	2
Lettland	19.202	13
Litauen	20.543	n.a.
Luxemburg	939	28
Malta	48	29
Niederlande	18.368	25
Österreich	64.733	11
Polen	108.395	n.a.
Portugal	31.640	7
Rumänien	123.550	n.a.
Schweden	38.228	22
Slowakei	1.021	n.a.
Slowenien	19.396	n.a.
Spanien	104.242	4
Tschechien	73.398	3
Ungarn	73.886	n.a.
Vereinigtes Königreich	67.120	n.a.
Zypern	146	n.a.

Quelle: IRENA 2018

6.3 UNSD: Energiestatistik

Die statistische Abteilung der Vereinten Nationen (UNSD) ermittelt in jährlichen Befragungen die Verwendung von Energieträgern in Ländern der gesamten Welt. Die Befragungsergebnisse sind im Datenportal der Vereinten Nationen veröffentlicht²¹ (UNSD 2019a, UNSD 2019b).

UNSD unterscheidet 5 Brennstoffkategorien. Hierzu zählen Produkte aus Kohle und Torf, Öl, Gas, Strom und Fernwärme sowie Biomasse und Abfall. Je nach Energieträger werden Brennstoffe in Gewicht, Volumen oder Energieeinheiten angegeben. Holz wird in Volumeneinheiten angegeben und in der Brennstoffkategorie Biomasse und Abfall, differenziert nach Brennholz und Schwarzlauge, erfasst (UNSD 2019a).

Die Verwendung der Energieträger wird in der Struktur einer Energiebilanz ermittelt, die zwischen Primärenergie-, Umwandlungs- und Endenergiebilanz unterscheidet. In der Primärenergiebilanz werden die Produktion, Handel und Lagerbestandsänderungen von Primärenergieträgern angegeben. In der Umwandlungsbilanz wird für 8 Untersektoren die Umwandlung von Primärenergieträgern (z. B. Erdgas, Öl und Holz) in Sekundärenergieträger (z. B. Strom, Fernwärme und Holzkohle) sowie der Eigenverbrauch im Energiesektor für 5 Untersektoren ermittelt. Beim Endenergieverbrauch werden 3 Untersektoren (Industriesektor, Transport und Sonstige) unterschieden. Der Haushaltssektor zählt zu den sonstigen Endenergieverbrauchern (UNSD 2019a).

²¹ UNdata, Energy Statistics Database: <http://data.un.org/Explorer.aspx>

Tabelle 16 zeigt, dass der Brennholzeinsatz in den Haushaltssektoren der Mitgliedsländer der EU28 im Jahr 2015 für den Großteil (75 %) der Länder geschätzt wurde. Whiteman (2017) geben an, dass in der Energiestatistik Holzverbräuche häufig durch die Multiplikation von Bevölkerungszahlen und Verbrauchskennziffern berechnet werden. Neben Brennholz berücksichtigt UNSD außerdem den Einsatz von Schwarzlauge. Da Schwarzlauge im Haushaltssektor keine Verwendung findet, ist der Verbrauch hier nicht aufgeführt (UNSD 2019b).

Tabelle 16: Verwendung von Brennholz in den Haushaltssektoren der EU28-Mitgliedsländer in Mio. m³ im Jahr 2015

Land	Brennholz in Mio. m ³	Schätzung
Belgien	2,174	Ja
Bulgarien	3,282	Ja
Dänemark	4,212	Ja
Deutschland	23,646	Ja
Estland	0,811	Ja
Finnland	5,478	Ja
Frankreich	29,624	Ja
Griechenland	2,788	Ja
Irland	0,148	Ja
Italien	28,503	Ja
Kroatien	5,272	Nein
Lettland	2,094	Nein
Litauen	2,185	Ja
Luxemburg	0,094	Ja
Malta	0,005	Nein
Niederlande	2,011	Nein
Österreich	7,086	Ja
Polen	11,544	Ja
Portugal	3,464	Nein
Rumänien	13,525	Nein
Schweden	4,185	Ja
Slowakei	0,112	Ja
Slowenien	2,093	Ja
Spanien	11,411	Nein
Tschechien	7,424	Ja
Ungarn	6,632	Ja
Vereinigtes Königreich	3,675	Ja
Zypern	0,010	Ja

Quelle: UNSD 2019b

6.4 FAO/UNECE/ITTO/Eurostat: Joint Forest Sector Questionnaire

Die Wirtschaftskommission der Vereinten Nationen für Europa (UNECE), Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO), Internationale Organisation für tropisches Holz (ITTO) und Eurostat erfassen im Joint Forest Sector Questionnaire (JFSQ) die Produktion und den Handel von Holzsortimenten. Für die Länder der nördlichen Hemisphäre (ECE Region) stellt der JFSQ die zentrale Berichterstattung der internationalen Statistik der Forst- und Holzwirtschaft dar. Die Ergebnisse der Befragung fließen unter anderem in die globale Datenbank der FAO²² ein und sind auf den jeweiligen Datenportalen der beteiligten Organisationen abrufbar. Holzmengen sind in Volumen- oder Masseinheiten angegeben (Glasenapp und McCusker 2018, UNECE/FAO 2013).

Im JFSQ werden sowohl die klassischen Holzprodukte, wie z. B. Rundholz, Schnittholz, Holzwerkstoffe oder Papier, als auch Energieholzprodukte, wie z. B. Holzkohle, Holzpellets und sonstige Presslinge, angegeben. Es wird zwischen der Entnahme und dem Handel von Rundholz aus dem Wald sowie der Produktion und dem Handel von Holzprodukten unterschieden. Das entnommene Rundholz wird in industrielles Nutzholz und Brennholz aufgeteilt. Hierbei sei angemerkt, dass eine Kategorisierung nach stofflicher und energetischer Nutzung durch Aufkommensstatistiken schwierig ist und insbesondere der energetische Waldholzeinsatz oft nicht richtig abgebildet wird (UNECE/FAO 2013, Mantau et al. 2017, Glasenapp und Weimar 2019).

Die überwiegend für die energetische Verwendung produzierten oder gehandelten Holzprodukte sind Holzkohle, Holzpellets und sonstige Presslinge. Bei Hackschnitzeln und Sägespänen sowie Reststoffen aus der industriellen Holzbe- und -verarbeitung ist zumindest teilweise von einer energetischen Verwendung auszugehen (Glasenapp und McCusker 2018, Glasenapp und Weimar 2019). Aufgrund der möglichen energetischen Nutzung von Holzprodukten, die nicht dem Brennholz zugeordnet werden, und fehlender Informationen zu den Verwendungssektoren, kann die energetische Holzverwendung im Haushaltssektor nicht zweifelsfrei aus Daten des JFSQ abgeleitet werden (Mantau et al. 2017).

6.5 UNECE/FAO: Joint Wood Energy Enquiry

Der Joint Wood Energy Enquiry (JWEE) wurde von UNECE und FAO entwickelt, um die energetische Nutzung von Holzsortimenten genauer zu bestimmen. Außerdem wird mit dem JWEE das Ziel verfolgt, die Statistiken der Energiewirtschaft sowie Forst- und Holzwirtschaft zu verbinden. Im JWEE berichten Mitgliedsländer der UNECE, inklusive der EU28, seit dem Jahr 2005 alle zwei Jahre die energetische Holzverwendung im jeweiligen Land. Holzmengen werden in Masse- oder Volumeneinheiten angegeben. Die Teilnahme an der Befragung erfolgt freiwillig und Ergebnisse werden im Datenportal der UNECE²³ zur Verfügung gestellt (Glasenapp und McCusker 2018).

Der Fragebogen des JWEE besteht aus vier Tabellen. In den ersten beiden Tabellen wird die Produktion und der Handel von Holzsortimenten berücksichtigt, die sowohl energetisch als auch stofflich verwendet werden. Für einige Sortimente, wie z. B. industrielles

²² FAOSTAT, Forestry Production and Trade: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>

²³ UNECE, Joint Wood Energy Enquiry: <http://www.unece.org/forests/jwee.html>

Nutzholz und Brennholz aus dem Wald sowie Holzpellets, stimmen die Angaben im JWEE mit denen aus dem JFSQ überein. Andere Sortimente, wie z. B. Schwarzlauge oder Rinde, werden aus Informationen des JFSQ hergeleitet. In der dritten Tabelle wird der Rohstoffeinsatz zur Herstellung von Energieholzprodukten (z. B. Holzpellets oder Holzkohle) angegeben (Glasenapp und McCusker 2018).

Daten zur energetischen Holzverwendung nach Holzsortimenten und Verwendungssektoren werden in der vierten Tabelle erhoben. Diese Tabelle ist der zentrale Bestandteil des JWEE. Die berücksichtigten Holzsortimente orientieren sich im Detailgrad am JFSQ (vgl. Kapitel 6.4). Um Besonderheiten in der energetischen Holzverwendung zu erfassen, wurden allerdings weitere, relevante Sortimente hinzugefügt. Beispielsweise unterscheidet der JWEE zwischen der energetischen Verwendung von industriellem Nutzholz und Brennholz aus dem Wald und anderen Flächen (z. B. Gärten, Parks, Straßenvegetation). Darüber hinaus wird die Verwendung von Schwarzlauge und flüssigen Holzbrennstoffen berücksichtigt (Glasenapp und McCusker 2018).

Der JWEE differenziert außerdem verschiedene Verwendungssektoren. Im Grundsatz stimmt die Struktur der Verwendungssektoren mit dem Aufbau der internationalen Energiestatistik (vgl. Kapitel 6.1) überein. Lediglich die Definition des Industriesektors weist Unterschiede auf. Im JWEE wird das gesamte Holz, das im Industriesektor (z. B. Sägewerke und Zellstoffproduzenten) energetisch eingesetzt wird, als Endverbrauch des Industriesektors angegeben. In der Berichterstattung von IEA/Eurostat/UNECE (vgl. Kapitel 6.1) wird im Industriesektor ausschließlich der Holzeinsatz zur Wärmeerzeugung für den Eigenbedarf erfasst. Holz, das zur Wärmeerzeugung für den Verkauf oder Stromerzeugung verwendet wird, wird im Umwandlungssektor als autoproduzierte Energie angegeben. Für die übrigen Sektoren und insbesondere für den Haushaltssektor stimmen die Definitionen beider Berichterstattungen überein (Glasenapp und McCusker 2018, Glasenapp und Weimar 2019).

In Tabelle 17 ist der energetische Holzeinsatz (ohne Holzkohle) der Haushaltssektoren der EU28 nach Holzsortimenten in Tonnen absolut trockenem Holz dargestellt. Insgesamt liegen Angaben für 22 Mitgliedsländer zu unterschiedlichen Zeitpunkten vor. Zum aktuellsten Jahr, dem Jahr 2015, machten 18 EU-Mitgliedsländern Angaben zum energetischen Holzeinsatz in Haushalten. Für jeweils 2 Mitgliedsländer stammen die aktuellsten Informationen aus den Jahren 2011 und 2013 (JWEE 2019).

Zur besseren Darstellung wurden Holzsortimente in drei Hauptkategorien und sieben Unterkategorien zusammengefasst. Die Hauptkategorien unterscheiden zwischen Holz aus primären, sekundären und tertiären Quellen. Holz aus Primärquellen beinhaltet unbehandeltes, industrielles Nutzholz und Brennholz. Es ist in die Unterkategorien Holz aus dem Wald und Holz aus anderen Flächen aufgeteilt. Holz aus Sekundärquellen umfasst Restholz aus der Holzbe- und -verarbeitung. Es wird zwischen unbearbeitetem Restholz (z. B. Hackschnitzel und Sägespäne, sonstiges Restholz) und Energieholzprodukten (z. B. Holzpellets und Briketts) unterschieden. Gebrauchtholz ist als Holz aus tertiären Quellen angegeben (Glasenapp und McCusker 2018, JWEE 2019).

Aufgrund der unterschiedlichen Bezugsjahre sind die Angaben zur absoluten Holzverwendung nicht für alle Länder vergleichbar. Für Länder, die zum Jahr 2015 Daten bereitstellten, gaben Frankreich (13,4 Mio. t atro), Italien (13,2 Mio. t atro) und

Deutschland (13,1 Mio. t atro) die höchsten Holzverbräuche (ohne Holzkohle) im Haushaltssektor an.

Bei Betrachtung der Holzsortimente wird deutlich, dass Haushalte Brennholz überwiegend direkt aus dem Wald (68 %) beziehen. Der Anteil von Primärholz aus anderen Flächen war mit 10 % deutlich kleiner. Holz aus Sekundärquellen machte insgesamt einen Anteil von 17 % aus. Hiervon entfiel der größte Anteil auf Energieholzprodukte (70 %). Holz aus tertiären Quellen bzw. Gebrauchtholz hatte mit 2 % einen kleinen Anteil. 4 % entfiel auf Holz mit unbekannter Herkunft (JWEE 2019). Es sei angemerkt, dass bei der Darstellung der Sortimentsverteilungen die aktuellsten Länderangaben verwendet wurden. Dieses Vorgehen impliziert, dass Änderungen in der Sortimentsverteilung keinen großen jährlichen Schwankungen unterliegen.

Tabelle 17: Energetische Holzverwendung (ohne Holzkohle) in den Haushaltssektoren der EU28-Mitgliedsländer und nach Holzsortimenten

Land	Energetischer Holzeinsatz in 1000 t atro	in % Gewichteinheiten						
		Primärquelle aus dem Wald	Primärquelle nicht aus dem Wald	Sekundärquelle unbearbeitet	Sekundärquelle Energieholzprod.	Tertiärquelle	Unbekannt	
Belgien	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Bulgarien ^c	1.423	100	0	0	0	0	0	0
Dänemark ^b	1.142	0	0	4	96	0	0	0
Deutschland ^a	13.100	66	9	10	10	5	0	0
Estland ^a	778	68	1	28	3	0	0	0
Finnland ^a	2.476	79	0	16	2	3	0	0
Frankreich ^a	13.369	59	20	14	7	0	0	0
Griechenland	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Irland ^b	102	85	0	0	15	0	0	0
Italien ^a	13.148	85	0	3	13	0	0	0
Kroatien ^a	1.641	57	34	8	1	0	0	0
Lettland ^a	207	65	0	7	28	0	0	0
Litauen ^a	1.052	68	10	5	12	2	4	0
Luxemburg ^a	81	94	0	4	2	0	0	0
Malta	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Niederlande ^a	963	18	55	9	2	17	0	0
Österreich ^a	3.308	65	21	2	11	0	0	0
Polen ^a	11.100	100	0	0	0	0	0	0
Portugal ^a	2.892	96	0	0	4	0	0	0
Rumänien ^c	6.573	25	0	0	0	0	75	0
Schweden ^a	2.065	80	0	0	20	0	0	0
Slowakei ^a	520	90	6	0	4	1	0	0
Slowenien ^a	1.098	63	14	1	12	0	10	0
Spanien	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Tschechien ^a	3.671	73	22	0	5	0	0	0
Ungarn	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
Vereinigtes Königreich ^a	3.927	51	26	2	12	10	0	0
Zypern	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.

Anmerkungen: ^a JWEE 2015, ^b JWEE 2013, ^c JWEE 2011; Quelle: JWEE 2019

6.6 Europäische Kommission: Fortschrittsberichte für erneuerbare Energien

Mit der Erstellung von Nationalen Aktionsplänen für erneuerbare Energien nach EU-Richtlinie 2009/28/EG haben die Mitgliedsländer der Europäischen Union (EU) Strategien zur Erreichung der verbindlichen Ausbauziele für erneuerbare Energien vorgelegt, sodass bis ins Jahr 2020, 20 % des Bruttoendenergieverbrauchs²⁴ in der EU durch erneuerbaren Energien gedeckt wird. Für die Erreichung des europäischen Ziels müssen die einzelnen EU-Mitgliedsstaaten nationale Gesamtziele erreichen. Die Ziele sind in Tabelle 18 aufgeführt. Die höchsten Ausbauziele für erneuerbare Energien haben Schweden (49 %), Lettland (40 %) und Finnland (38 %). Deutschland befindet sich mit 18 % erneuerbare Energieträger am gesamten Bruttoendenergieverbrauch im Mittelfeld. Die größten Differenzen zwischen den Startwerten im Jahr 2005 und den Zielwerten im Jahr 2020 weisen Dänemark (15,1 %), das Vereinigte Königreich (13,9 %) und Irland (13,6 %) auf. Auch Deutschland ist mit 11,8 % im oberen Bereich zu finden (EU 2009).

Tabelle 18: Nationale Gesamtziele zum Ausbau der erneuerbaren Energien nach EU-Richtlinie 2009/28/EG für die EU28

Land	Anteil an erneuerbaren Energien im Bruttoendenergieverbrauch in %		
	2005	2020	Differenz
Belgien	2	13	11,1
Bulgarien	9	16	6,6
Dänemark	15	30	15,1
Deutschland	6	18	11,8
Estland	18	25	6,6
Finnland	29	38	8,8
Frankreich	10	23	13,5
Griechenland	7	18	11,1
Irland	2	16	13,6
Italien	6	17	10,7
Kroatien	23	20	-3,4
Lettland	33	40	7,2
Litauen	17	23	5,8
Luxemburg	1	11	10,1
Malta	0	10	9,9
Niederlande	2	14	12,0
Österreich	23	34	11,3
Polen	7	15	8,1
Portugal	19	31	11,8
Rumänien	16	24	7,8
Schweden	39	49	10,3
Slowakei	6	14	7,6
Slowenien	16	25	8,9
Spanien	8	20	11,7

²⁴ Der Bruttoendenergieverbrauch ist die Summe aus dem gesamten Endenergieverbrauch, Eigenverbrauch im Umwandlungssektor sowie Transport- und Leitungsverluste (EU 2009).

Land	Anteil an erneuerbaren Energien im Bruttoendenergieverbrauch in %		
	2005	2020	Differenz
Tschechien	7	13	6,1
Ungarn	4	13	8,6
Vereinigtes Königreich	1	15	13,9
Zypern	3	13	9,9

Quelle: EU 2009

Seit dem Jahr 2011 berichten die Mitgliedsländer der EU28, alle zwei Jahre über den Fortschritt zur Erreichung der nationalen Ausbauziele. Für zwei Referenzjahre werden in den Fortschrittsberichten das inländische Biomasseaufkommen und Einfuhren aus der EU sowie Nicht-EU-Ländern angegeben. Die Standardeinheiten sind Volumen und Energieeinheiten. Holzenergie gilt als feste Biomasse und wird in Holz aus Primär-, Sekundär- und Tertiärquellen, sowie Holz aus Kurzumtriebsplantagen und sonstige Quellen aufgeteilt. Holz aus Primärquellen umfasst dabei Holz aus dem Wald und anderen Flächen. Nebenprodukte aus der industriellen Holzverarbeitung sind als Holz aus Sekundärquellen definiert. Gebrauchtholz zählt zu den tertiären Holzquellen. In den Fortschrittsberichten werden keine Angaben über die sektorale Verwendung von Holz gemacht. Aus diesem Grund lässt sich aus dieser Datenquelle nicht ableiten, wieviel Holzenergie im Haushaltssektor verwendet wird (EU 2009).

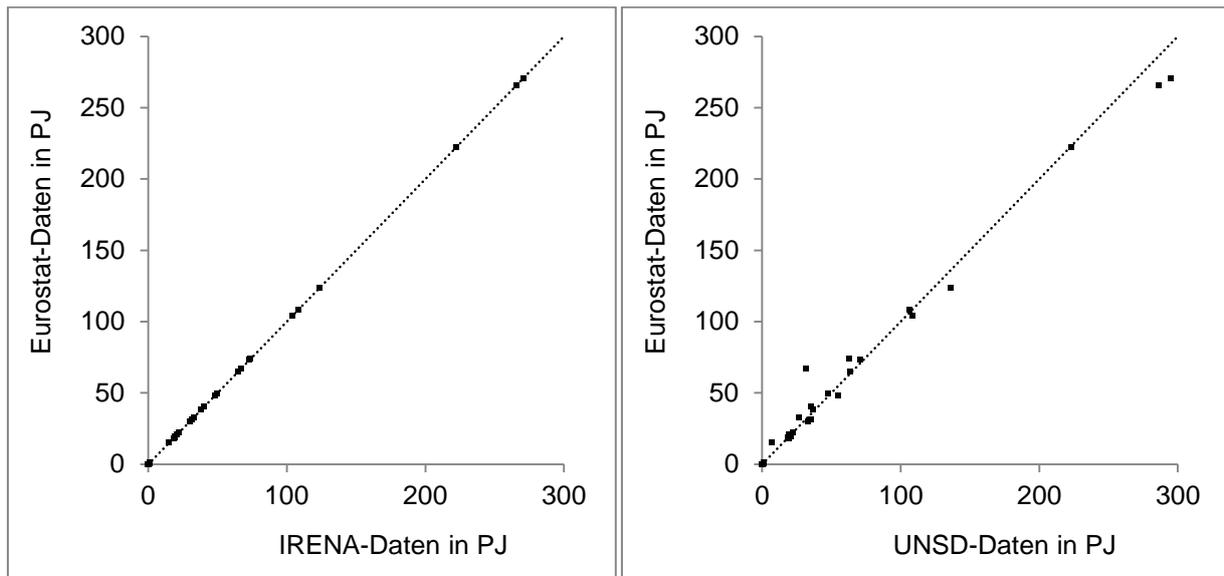
6.7 Vergleich der Statistiken

Im Folgenden werden die Angaben der Statistiken zum energetischen Holzeinsatz in den Haushaltssektoren der EU28 verglichen. Für den Vergleich werden jeweils die länderspezifischen Angaben zweier Statistiken in einem Streudiagramm abgebildet. Als Referenz ist eine gestrichelte Gerade in das Streudiagramm eingezeichnet, die einen Achsenabschnitt von 0 und eine Steigung von 1 aufweist. Wenn die Angaben der jeweiligen Statistiken übereinstimmen, liegen alle Punkte auf dieser Referenzgeraden. Außerdem wurde für den Vergleich ein Pearson-Korrelationskoeffizient (r) berechnet, um den Grad der Übereinstimmung zu quantifizieren. Bei einer guten Übereinstimmung nimmt r einen Wert nahe 1 an (Bortz 2005, Sachs und Hedderich 2006, Kähler 2011).

In der Energiestatistik stellt IEA/Eurostat/UNECE (vgl. Kapitel 6.1) Informationen zur Nutzung von fester Biomasse im Haushaltssektor bereit. Feste Biomasse enthält dabei sowohl verholzte als auch nicht verholzte Biomasse. IRENA (vgl. Kapitel 6.2) erfasst ebenfalls den energetischen Einsatz fester Biomasse in den Haushaltssektoren der EU28 und macht für manche Länder zusätzlich Angaben zur Nutzung von Pellets. Die Gegenüberstellung der Daten in Abbildung 20 verdeutlicht, dass sich die Angaben der beiden Statistiken für das Jahr 2015 auf der Referenzlinie befinden. Außerdem bestätigt der Pearson-Korrelationskoeffizient von $r = 1$, dass die Daten von IRENA und IEA/Eurostat/UNECE übereinstimmen.

UNSD erfasst Daten zum Brennholzeinsatz im Haushaltssektor der EU28 und gibt den Brennholzverbrauch in Volumeneinheiten an. Für die Umrechnung in Energieeinheiten wurden Faktoren aus Kapitel 2 bzw. Anhang A.IV und länderspezifische Sortimentsverteilungen aus dem UNECE/FAO JWEE zum aktuellsten Jahr verwendet (vgl. Kapitel 6.5). Für EU28-Mitgliedsländer mit fehlenden Angaben zur Sortimentsverteilung wurden durchschnittliche Umrechnungsfaktoren aus den Faktoren der Länder berechnet für

die Werte bekannt sind. In Abbildung 20 sind die Verbrauchsangaben in PJ aus UNSD und IEA/Eurostat/UNECE für das Jahr 2015 gegenübergestellt. Die meisten Werte liegen auf der Referenzlinie. Allerdings sind auch Abweichungen zu erkennen. Der Pearson-Korrelationskoeffizient nimmt dadurch einen Wert von $r = 0,99$ an. Die leichten Unterschiede sind durch die Modellierung von Verbrauchswerten bei UNSD und die Verwendung von Umrechnungsfaktoren, die unter Umständen nicht mit den länderspezifischen Faktoren übereinstimmen, zu begründen. Außerdem können Unterschiede entstehen, wenn Haushalte kleine Mengen nicht-verholzter Biomasse einsetzen, die von UNSD nicht erfasst, bei IEA/Eurostat/UNECE allerdings enthalten sind.



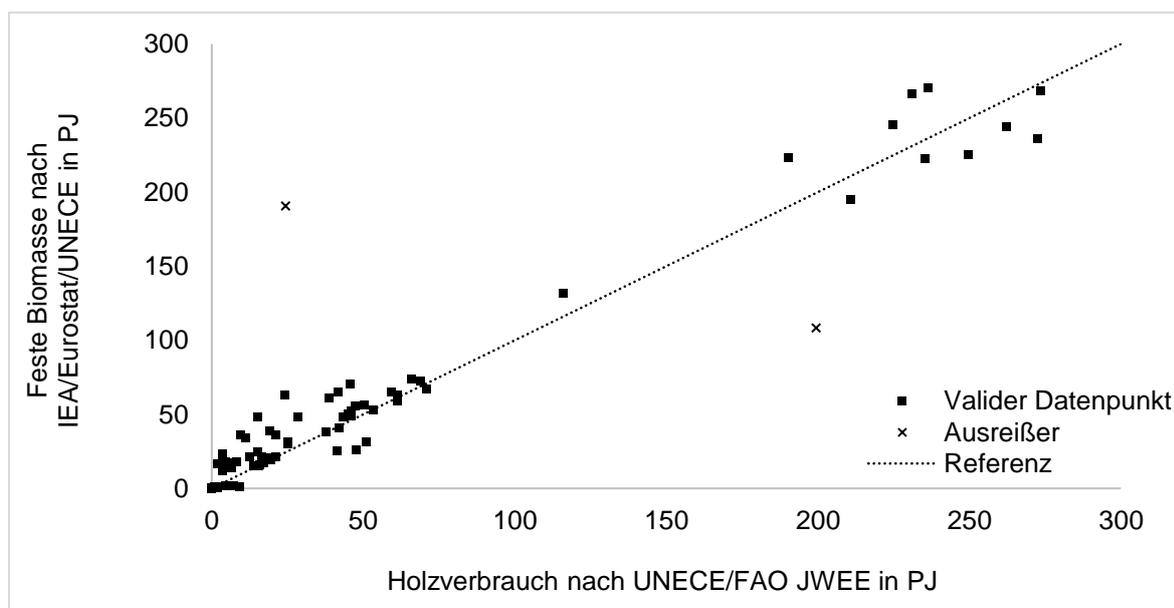
Quelle: IRENA 2018, Eurostat 2019b

Quellen: Eurostat 2019b, UNSD 2019b

Abbildung 20: Vergleich der Daten aus IRENA, UNSD und IEA/Eurostat/UNECE, jeweils zum Jahr 2015

Der UNECE/FAO JWEE ist der Statistik der Forst- und Holzwirtschaft zuzuordnen und erfasst detaillierte Angaben zum energetischen Einsatz von Holzsortimenten im Haushaltssektor. Für den Vergleich mit Angaben aus IEA/Eurostat/UNECE wurden Verbrauchsangaben der Jahre 2007, 2009, 2011, 2013 und 2015 in Energieeinheiten umgerechnet. Der JWEE verwendet als Referenzeinheit Tonnen absolut trockenes Holz. Für die Umrechnung in Energieeinheiten wurden Informationen zur Holzfeuchte und länderspezifische Heizwerte in Relation zum Gewicht verwendet (vgl. Kapitel 2, Anhang A.III). Vor dem Vergleich wurden aus den Daten des JWEE Angaben für Italien zu den Jahren 2009 und 2011 sowie Polen zum Jahr 2015 als fehlerhaft identifiziert und aus dem Datensatz entfernt.

Der Vergleich der Angaben zeigt, dass die Angaben um die Referenzlinie streuen (Abbildung 21). Der Pearson-Korrelationskoeffizient nimmt einen Wert von $r = 0,98$ an. Die Unterschiede der Statistiken können auf die Verwendung von unterschiedlichen Umrechnungsfaktoren und Datenquellen zurückgeführt werden, da beide Statistiken bei der Datenerfassung auf unterschiedliche Netzwerke von nationalen Korrespondenten zugreifen.



Quellen: Eurostat 2019b, JWEE 2019

Abbildung 21: Vergleich der Daten aus UNECE/FAO und IEA/Eurostat/UNECE für die Jahre 2007, 2009, 2011, 2013 und 2015

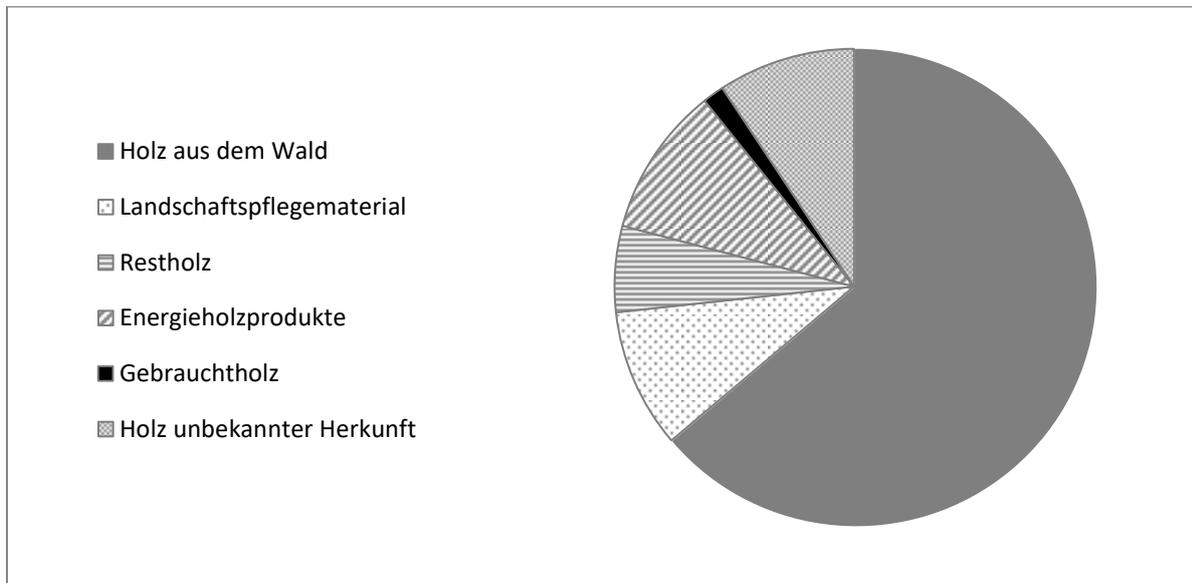
Die Verschneidung von Daten aus Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft sowie des Energiesektors bietet die Möglichkeit abzuschätzen, welche Holzsortimente in Haushalten der EU28-Mitgliedsländer energetisch verwendet werden. Diese Informationen sind für die Nachhaltigkeitsbewertungen von Bedeutung (EU 2009, EU 2018, SDG 2019a, SDG 2019b).

Für eine Schätzung der Sortimentsverteilung im Jahr 2015 wurde der Energiestatistik Informationen zum Einsatz fester Biomasse bzw. Holz in Haushalten der EU28-Mitgliedsländer entnommen (Eurostat 2019b). Die Statistik der Forst- und Holzwirtschaft stellt für einige Länder der EU28 detaillierte Informationen zur Sortimentsverteilung zur Verfügung, die durch Umrechnungsfaktoren in Energieeinheiten umgerechnet wurden (vgl. Kapitel 2, JWEE 2019). Wenn für Länder zum Jahr 2015 keine, für andere Jahre jedoch Angaben vorlagen, wurden die aktuellsten Werte verwendet. Anschließend wurden die länderspezifischen Sortimentsverteilungen in Prozentwerte umgerechnet. Für Mitgliedsländer ohne Angaben²⁵ wurden Sortimentsverteilungen durch die Durchschnittswerte der vorhandenen Angaben geschätzt (vgl. Kapitel 6.5). Die Verschneidung der absoluten Verbräuche aus der Energiestatistik und die anteilige Sortimentsverteilung aus der Statistik der Forst- und Holzwirtschaft liefert den Holzverbrauch in Haushalten der EU28 nach Holzsortimenten.

Im Jahr 2015 verbrauchten Haushalte der EU28 1.764 PJ feste Biomasse bzw. Holz (Eurostat 2019b). Wie in Abbildung 22 dargestellt, verwendeten Haushalte überwiegend Brennholz aus dem Wald. Außerdem hatte Holz aus unbekannter Herkunft, Energieholzprodukte und Landschaftspflegeholz (z. B. Holz aus dem Garten) größere Anteile an der Brennholznutzung. Gebrauchtholz spielte eine geringe Bedeutung in Haushalten. Die Ergebnisse ähneln denen für Deutschland (vgl. Kapitel 3.5) und ausgewählte Länder der nördlichen Hemisphäre (ECE-Region, Glasenapp und McCusker 2018). An dieser Stelle soll darauf hingewiesen sein, dass die Erstellung von Zeitreihen, beispielsweise durch Interpolation der Sortimentsverteilungen (TI-WF 2019), nicht für alle EU28-Mitgliedsländer

²⁵ Mitgliedsländer, für die keine Sortimentsverteilung vorliegt: Griechenland, Malta, Spanien, Ungarn und Zypern.

möglich ist. Diese Einschränkung ist auf die unregelmäßige Berichterstattung an den JWEE zurückzuführen (Glasenapp und McCusker 2018).



Quellen: Eurostat 2019b, JWEE 2019

Abbildung 22: Der energetische Holzeinsatz nach Holzsortimenten in den Haushaltssektoren der EU28-Mitgliedsländern im Jahr 2015

6.8 Diskussion

Grundsätzlich liefern die Statistiken des Energiesektors und der Forst- und Holzwirtschaft ähnliche Angaben zum energetischen Holzeinsatz in Haushalten der EU28. Um die Übereinstimmung beider Statistiken weiter zu verbessern, wäre eine engere Zusammenarbeit der relevanten Akteure nötig. Dies betrifft insbesondere die Verwendung derselben Datenquellen und Umrechnungsfaktoren (Glasenapp und McCusker 2018). Deutschland ist ein gutes Beispiel dafür, dass die Zusammenarbeit von Akteuren beider Statistiken die Übereinstimmungen in den Statistiken verbessert. In der Vergangenheit erstellten sowohl die AGEB für die Energiestatistik (vgl. Kapitel 3.1) als auch das Thünen-Institut für die Statistik der Forst- und Holzwirtschaft (vgl. Kapitel 3.2) eigene Zeitreihen zur energetischen Holzverwendung im Haushaltssektor. Auf Initiative der AGEE-Stat wurde festgelegt, dass der energetische Holzeinsatz in Haushalten ab dem Jahr 2018 für beide Statistiken auf Grundlage der Zeitreihe des Thünen-Instituts berechnet und an internationale Statistiken berichtet wird.

Auch die Verwendung einheitlicher Umrechnungsfaktoren trägt zu einer besseren Vergleichbarkeit der Statistiken bei. In Kapitel 2 wurde ein Verfahren vorgestellt, um Umrechnungsfaktoren für Holzsortimente zu berechnen. Hierbei wurden Sortimentseigenschaften (z. B. Holzfeuchte) aus Sekundärquellen (z. B. Normen) abgeleitet. Um die Genauigkeit der Faktoren für die EU28-Mitgliedsländer zu verbessern, bietet es sich an diese Sortimentseigenschaften, im Rahmen der Befragungen des JWEE, zu erfassen. Außerdem wäre es sinnvoll, die erfasste Sortimentsstruktur dahingehend anzupassen, dass unterschiedliche Holzfeuchten eines Sortiments (z. B. für Hackschnitzel) berücksichtigt werden können.

7 Zusammenfassung

Informationen zum Brennholzeinsatz in Haushalten werden von Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft sowie des Energiesektors bereitgestellt. Beide Statistiken unterscheiden sich in der Struktur und dem Detailgrad der ausgewiesenen Informationen. Während die Statistik der Forst- und Holzwirtschaft Mengenströme von Holzsortimenten in Volumen- oder Gewichtseinheiten quantifiziert, wird die Holzverwendung in der Energiestatistik häufig als Aggregat, in Energieeinheiten angegeben. Um Informationen beider Statistiken vergleichen zu können, müssen die Einheiten umgerechnet werden. Aufgrund der detaillierten Informationen zu den Holzsortimenten bietet sich die Statistik der Forst- und Holzwirtschaft für eine genaue Berechnung des Energiegehalts in der Holzverwendung an.

Für die Berechnung von Umrechnungsfaktoren werden Informationen zu den Holzarteneigenschaften (z. B. Darrdichte, Quellverhalten und Heizwert) benötigt. Mit Hilfe der Holzartenverteilung im Holzvorrat wurde der Informationsgehalt reduziert und gewichtete durchschnittliche Holzeigenschaften für Laub- und Nadelholz berechnet. Auf Grundlage von Literaturangaben wurden außerdem Annahmen zu Nadelholzanteilen und Holzfeuchten von Sortimenten getroffen und anschließend länderspezifische Umrechnungsfaktoren berechnet.

Für Deutschland lagen die sortimentspezifischen Faktoren für den Heizwert im Verhältnis zum Gewicht zwischen 14,36 und 17,05 MJ/kg sowie bei 14,51 bis 17,00 MJ/kg für die EU28. Faktoren zur Umrechnung von Volumen- in Energieeinheiten nahmen für Deutschland Werte von 7.638 bis 10.252 MJ/m³ und für die EU28 Werte von 7.953 bis 9.965 MJ/m³ an. Den größten Einfluss auf die Ergebnisse hatte die Holzfeuchte. Insbesondere bei Faktoren in Relation zum Gewicht bewirkten Änderung über das gesamte Wertespektrum der Holzfeuchte deutliche Änderungen in den Umrechnungsfaktoren. Faktoren im Verhältnis zum Volumen zeigten, aufgrund der Schwind- und Quelleigenschaften von Holz, Änderungen bei Holzfeuchten von bis zu 30 %. Im Vergleich zu Angaben aus der Literatur wiesen die Ergebnisse gute Übereinstimmungen auf. Zusätzlich sind die berechneten Faktoren jedoch detaillierter und erlauben eine genauere Umrechnung von spezifischen Angaben aus der Statistik der Forst- und Holzwirtschaft. Die Berechnung der Umrechnungsfaktoren könnte verbessert werden, wenn z. B. empirische Daten zum Holzfeuchtegehalt einzelner Sortimente erhoben würden.

In Deutschland wurde der Brennholzeinsatz im Haushaltssektor in mehreren Erhebungen erfasst, die den Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft sowie des Energiesektors zuzuordnen sind. Die empirischen Studien weisen ähnliche Methoden bei der Datenerfassung und Hochrechnung auf. Im Allgemeinen wird der individuelle Brennholzeinsatz von Haushalten in Stichprobenbefragungen erfasst. Auf dieser Grundlage werden Verbrauchskennziffern bestimmt und der Brennholzeinsatz über Hochrechnungsgrößen für den deutschen Wohnungsbestand berechnet. Für Jahre in denen keine empirischen Erhebungsdaten vorliegen, werden Holzverbräuche durch statistische Modelle geschätzt. Die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik (AGEE-Stat) und Arbeitsgruppe Energiebilanzen (AGEB) verwenden die Ergebnisse der empirischen Studien, um offizielle Zeitreihen zum energetischen Holzeinsatz in Haushalten zu erstellen. Aufgrund von Unterschieden in den Datenquellen und Revisionen stimmen beide Zeitreihen nicht überein. Ab dem Berichtsjahr 2018 ist davon auszugehen, dass die Angaben beider Statistiken, durch die Verwendung derselben Datenbasis, übereinstimmen.

Im Zeitraum von 2000 bis 2010 gehen die Studien im Durchschnitt von einem Anstieg des energetischen Holzeinsatzes von 142 auf 284 PJ (15 auf 30 Mio. m³) aus. Ab dem Jahr 2010 ging der Holzeinsatz auf 236 PJ (25 Mio. m³) im Jahr 2017 zurück. Der Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Studien verdeutlichte, dass sich Angaben zum Holzeinsatz teilweise stark unterscheiden. Unterschiede sind auf eine Vielzahl an Erfassungsschwierigkeiten zurückzuführen und können durch zufällige und systematische Fehler in der Erhebung sowie unterschiedliche Umrechnungsfaktoren und Modellannahmen erklärt werden. Ergebnisse zu den verwendeten Holzsortimenten legen nahe, dass Scheitholz aus dem Wald das wichtigste Holzsortiment für die Verwendung im Haushaltssektor war. Der Verbrauch von Scheitholz nahm in absoluten Zahlen tendenziell zu, während im selben Zeitraum die relativen Anteile zurückgingen. Die zunehmende Verwendung von Holzpellets begründet dabei den anteiligen Rückgang von Scheitholz. Die Bedeutung von Gebrauchtholz war für den Haushaltssektor aufgrund von gesetzlichen Bestimmungen gering.

Für den deutschen Holzmarkt hat die energetische Holzverwendung eine zunehmend wichtige Bedeutung. Seit dem Jahr 2009 weisen die energetischen Holzverwender ein ähnlich großes Nutzungsvolumen auf wie die stofflichen Verwender. Im Jahr 2016 verbrauchten Haushalte, nach der Sägeindustrie, das zweitgrößte Holzvolumen. Darüber hinaus setzten Haushalte, im Gegensatz zu anderen energetischen Holzverwendern, überwiegend Holz aus dem Wald ein. Für den Energiesektor spielt die energetische Holzverwendung eine untergeordnete Rolle. Importierte fossile Energieträger machen derzeit den größten Anteil am Energieaufkommen aus. Im Haushaltssektor waren Gas und Mineralöle die wichtigsten Energieträger für den Endenergieverbrauch. Obwohl die erneuerbaren Energien einen relativ geringen Anteil am Energieverbrauch hatten, war der Zuwachs in den vergangenen Jahren im Vergleich zu anderen Energieträgern am größten. Unter den erneuerbaren Energien (ohne erneuerbaren Strom bzw. Fernwärme) war Holzenergie der wichtigste Energieträger für Haushalte. In Zukunft soll der Beitrag von erneuerbaren Energien im Energiemarkt weiter steigen.

In Anbetracht der Bedeutung für den Holzmarkt und der Ausbauziele für den Energiesektor ist ein gutes Verständnis über Einflüsse auf die Entwicklung der Holznutzung in Haushalten wichtig. Vor diesem Hintergrund wurde ein ökonometrisches Modell berechnet, mit dem die Wirkungszusammenhänge relevanter Faktoren auf den energetischen Holzeinsatz in Haushalten untersucht wurden. Die Modellierung basiert auf einem Datensatz von 21.616 Haushalten zu den Jahren 2005, 2010 und 2014. Der Datensatz enthält Informationen zum Brennholzeinsatz in Haushalten als abhängige Variable sowie unabhängige Variablen, die Variationen im haushaltsspezifischen Brennholzeinsatz erklären können. Es wurde zwischen unabhängigen Variablen zu 1) Heiztechnologie, Haushaltseigenschaften und alternativen Energiepreisen; 2) Zugang zu Holzrohstoffen und Wetter sowie; 3) soziodemografischen Eigenschaften unterschieden. Da ein Großteil der Wohnungen des Haushaltssektors nicht mit Holz heizt, wurde für die Analyse ein linkszensiertes Tobit-Modell verwendet. Dieses Modell hat den Vorteil, dass es die Haushalte, die kein Brennholz nutzen, gesondert betrachtet und damit Aussagen über den gesamten Haushaltssektor zulässt.

In den Jahren 2005, 2010 und 2014 verbrauchten deutsche Haushalte durchschnittlich 0,75 bis 1,19 m³ Holz pro Jahr. Die verwendete Heiztechnologie hatte einen signifikanten Einfluss auf die Brennholznutzung. Haushalte mit Holzzentralheizungen wiesen einen, um 0,83 bis 1,82 m³, höheren jährlichen Holzverbrauch auf als Haushalte ohne Holzzentralheizungen. Jährliche Variationen in den Effekten werden durch Änderungen im Heizungsbestand sowie

Effizienzsteigerungen von Holzzentralheizungen erklärt. Die Ergebnisse bestätigen, dass der energetische Holzeinsatz durch die Förderung von Holzzentralheizungen effizient gesteigert werden kann. An dieser Stelle sei angemerkt, dass eine genauere Betrachtung der Heiztechnologien die Aussagekraft des Modells verbessern könnte. In zukünftigen Studien sollte dieser Aspekt bei der Datenerfassung und Modellbildung berücksichtigt werden.

Außerdem war die energetische Holznutzung positiv mit der Wohnfläche korreliert und reagierte elastisch auf Änderungen im Fertigstellungsjahr. Auch Preise für alternative Energieträger (z. B. Gas, Heizöl) waren signifikant mit dem Brennholzeinsatz korreliert. Wenn die Preise um 100 \$US pro Tonne Rohöläquivalente stiegen, erhöhte sich der energetische Holzeinsatz in Haushalten um zusätzliche 0,05 bis 0,11 m³. Maßnahmen zur Verbesserung der preislichen Konkurrenzfähigkeit von Holz gegenüber alternativen Energieträgern könnten demnach den Brennholzeinsatz erhöhen.

Auch die Holzverfügbarkeit, die durch Variablen zum Waldbesitz und Walddichte gemessen wurde, war positiv mit der energetischen Holzverwendung in Haushalten assoziiert. Haushalte mit Waldbesitz verwendeten 0,27 bis 0,52 m³ mehr Holz pro Jahr als Haushalte, die keinen Wald besaßen. Wenn in der Region eines Haushalts die Walddichte hoch war, war auch der jährliche Holzverbrauch höher als in Haushalten aus Regionen mit niedriger Walddichte. Außerdem konnte gezeigt werden, dass der Holzverbrauch mit zunehmender Einwohnerdichte sinkt. Der Trend zur Urbanisierung kann demnach einen Rückgang des Holzverbrauchs bedeuten.

Elastizitäten von Heizgradtagen lagen bei 0,83 bis 1,15, was Vermutungen zu einem starken Einfluss der Temperatur auf den Holzverbrauch bestätigt. Beim Nettoeinkommen wiesen Haushalte der unteren und oberen Einkommenskategorien signifikant höhere Holzeinsätze auf, als Haushalte der mittleren Einkommenskategorie. Dies verwundert, da vor der Modellspezifizierung davon ausgegangen wurde, dass überwiegend Haushalte der unteren Einkommenskategorien, aufgrund von Preisvorteilen, Brennholz verwenden. Die positiven Effekte von Haushalten mit überdurchschnittlichem Einkommen sind auf das überproportionale Vorkommen von Brennholznutzern in diesen Einkommenskategorien zurückzuführen.

Die Ergebnisse geben Aufschluss über die Wirkungsrichtung und Größenordnung von Einflüssen auf die energetische Holzverwendung im Haushaltssektor, wodurch potenzielle Maßnahmen zur Beeinflussung der Holzverwendung abgeleitet werden können. Die Entscheidung über die Durchführung von Maßnahmen kann allerdings nur auf Grundlage eines politischen Diskurses, durch Abwägen der positiven und negativen Folgen einer energetischen Holznutzung, getroffen werden.

In Europa ist die Datenlage zur energetischen Holznutzung in Haushalten weniger detailliert als für Deutschland. Informationen zur energetischen Holznutzung werden von Statistiken des Energiesektors und der Forst- und Holzwirtschaft bereitgestellt. Der Joint Wood Energy Enquiry (JWEE) der UNECE/FAO ist die einzige Berichterstattung der Forst- und Holzwirtschaft, die Aussagen zur Brennholznutzung im Haushaltssektor zulässt. Der Vergleich der Statistiken zeigte, dass Angaben der Energiestatistiken untereinander gute Übereinstimmungen aufweisen. Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft weisen im Vergleich zur Energiestatistik Unterschiede auf, die auf die Verwendung unterschiedlicher Datenquellen und Umrechnungsfaktoren zurückzuführen sind. Allerdings sind für das Jahr 2015 alle Statistiken in der Aussage konsistent, dass der deutsche Haushaltssektor im europäischen Vergleich, nach Frankreich und Italien, die drittgrößte Brennholzmenge

einsetzte. In den skandinavischen Ländern waren die Holzeinsätze, aufgrund der niedrigen Bevölkerungszahlen, gering.

Um die Vergleichbarkeit der Statistiken zu verbessern, ist eine engere Zusammenarbeit der relevanten Akteure nötig. Deutschland ist ein gutes Beispiel für eine erfolgreiche Zusammenarbeit. Durch die Verwendung der gleichen Datenbasis ab dem Jahr 2018 werden die Angaben beider Statistiken übereinstimmen. Außerdem sind allgemeingültige Umrechnungsfaktoren notwendig, um eine sektorübergreifende Verwendung der Daten zu gewährleisten. Die berechneten Umrechnungsfaktoren können die Grundlage für eine Verschneidung beider Statistiken bilden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen zu einem besseren Verständnis der energetischen Holzverwendung in deutschen und europäischen Haushalten bei. Es wurde auf die Strukturen in den nationalen und internationalen Statistiken eingegangen. Außerdem wurde die Bedeutung der energetischen Holznutzung für die erneuerbaren Energien in Deutschland und die nachhaltige Holznutzung diskutiert. Da Holzenergie sowohl für die Forst- und Holzwirtschaft als auch den Energiesektor relevant ist, wurde ein Verfahren zur Berechnung von Umrechnungsfaktoren entwickelt, das alle relevanten Sortimenten berücksichtigt. Die Umrechnungsfaktoren verbessern die Präzision und Vergleichbarkeit der deutschen und europäischen Statistiken. Außerdem ermöglichen transparente Umrechnungsfaktoren eine bessere Kommunikation zwischen den Sektoren der Forst- und Holzwirtschaft sowie des Energiesektors, was die Grundlage für eine genauere Statistik und die Bewertung der nachhaltigen Holznutzung darstellt. Die Analyse der Wirkungszusammenhänge zwischen dem Holzeinsatz in deutschen Haushalten und äußeren Einflüssen erbrachte wichtige Erkenntnisse über Mechanismen der energetischen Holzverwendung in einem der bedeutendsten Verwendungssektoren, dem Haushaltssektor. Auf Grundlage dieser Ergebnisse können Variationen im Holzeinsatz des Haushaltssektors nachvollzogen und Maßnahmen zur Beeinflussung der Holzverwendung abgeleitet werden.

Literaturverzeichnis

AGEB (2018): Auswertungstabellen zur Energiebilanz für die Bundesrepublik Deutschland 1990 bis 2017. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/10-0-Auswertungstabellen.html>, zuletzt geprüft am 07.06.2019.

AGEB (2019): Satellitenbilanz „Erneuerbare Energieträger“ zur Energiebilanz der Bundesrepublik Deutschland. Jahr 2000-2016. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/7-0-Bilanzen-1990-2017.html>, zuletzt geprüft am 18.11.2019.

Aguilar, F. X.; Glavonjić, B.; Hartkamp, R.; Mabee, W.; Skog, K.E. (2016): Chapter 9: Wood Energy. In: F. Steierer und M. Fonseca (Hg.): Forest Products. Annual Market Review 2014-2015 (ECE/TIM/SP/39), S. 91–100.

Alakangas, E. (2005): Properties of wood fuels used in Finland. Technical research center of Finland, VTT Processes (Biosouth project, PRO2/P2030/05).

Alakangas, E.; Virkkunen, M. (2007): Biomass fuel supply chains for solid biofuels. From small to large scale. Intelligent Energy Euope (EUBioNet 2).

Anttila, P. (2018): Sustainable levels of wood fuel removals. In: F. X. Aguilar (Hg.): Wood Energy in the ECE region. Data trends and outlook in Europe the Commonwealth of Independent States and North America (ECE/TIM/SP/42), S. 62–74.

Arabatzis, G.; Malesios, C. (2011): An econometric analysis of residential consumption of fuelwood in a mountainous prefecture of Northern Greece. In: *Energy Policy* (39), S. 8088–8097. DOI: 10.1016/j.enpol.2011.10.003.

Asikainen, A.; Aguilar, F. X. (2018): Chapter 1: The multiple functions of wood energy. In: F. X. Aguilar (Hg.): Wood Energy in the ECE region. Data trends and outlook in Europe the Commonwealth of Independent States and North America (ECE/TIM/SP/42), S. 1–10.

Auer, Ludwig von (2013): Ökonometrie. Eine Einführung. 6. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler.

BDEW (2017): Energiewirtschaftliche Entwicklung in Deutschland. Fakten und Argumente. 1. Quartal 2017. Bund der Energie und Wasserwirtschaft. Berlin.

BDEW (2019): Entwicklung des Wärmeverbrauchs in Deutschland, Basisdaten und Einflussfaktoren. 3. Aufl. Bundesverband der Energie- und Wasserwirtschaft e.V. Berlin. Online verfügbar unter https://www.bdew.de/media/documents/Awh_20190529_Waermeverbrauchsanalyse_jwZ6B_GZ.pdf, zuletzt geprüft am 08.10.2019.

Berry, C. (2014): Increase in wood as main source of household heating most notable in the Northeast. US Energy Information Administration. Online verfügbar unter <http://www.eia.gov/todayinenergy/detail.cfm?id=15431>, zuletzt geprüft am 15.04.2018.

Bioenergy Europe (2018): Statistical Report 2018. full report. Online verfügbar unter <http://achbiom.cl/wp-content/uploads/2019/02/STATISTICAL-REPORT-2018.pdf>, zuletzt geprüft am 14.11.2019.

Bioenergy Europe (2019): Statistical report 2019. Pellet report. Online verfügbar unter <https://bioenergyeurope.org/article.html/211>, zuletzt geprüft am 21.11.2019.

BMF (2019): 18.-26. Subventionsbericht der Bundesregierung, Bundesministerium der Finanzen. Online verfügbar unter https://www.bundesfinanzministerium.de/Web/DE/Themen/Oeffentliche_Finanzen/Subventionspolitik/subventionspolitik.html;jsessionid=50BA21652BF18AF2A5AD5F03E8030CFA, zuletzt geprüft am 08.10.2019.

BMJV (2004): Gesetz zur Durchführung einer Repräsentativstatistik über die Bevölkerung und den Arbeitsmarkt sowie die Wohnsituation der Haushalte. Mikrozensusgesetz 2005 - MZG 2005, vom zuletzt geändert durch Art. 1 G v. 02.12.2014 | 1926. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/mzg_2005/index.html, zuletzt geprüft am 08.10.2019.

BMJV (2013): Verordnung über energiesparenden Wärmeschutz und energiesparende Anlagentechnik bei Gebäuden. Energieeinsparverordnung - EnEV, vom Zweite Verordnung zur Änderung der Energieeinsparverordnung vom 18.11.2013. Fundstelle: BGBl. I S. 3951.

BMJV (2017a): Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG, vom vom 24.02.2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 2 Absatz 9 des Gesetzes vom 20.07.2017 (BGBl. I S. 2808) geändert worden ist. Fundstelle: BGBl. I S. 2808. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/KrWG.pdf>, zuletzt geprüft am 19.12.2019.

BMJV (2017b): Verordnung über Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Altholz. Altholzverordnung - AltholzV, vom vom 15.08.2002 (BGBl. I S. 3302), die zuletzt durch Artikel 62 des Gesetzes vom 29.03.2017 (BGBl. I S. 626) geändert worden ist. Fundstelle: BGBl. I S. 626. Online verfügbar unter <https://www.gesetze-im-internet.de/altholzv/AltholzV.pdf>, zuletzt geprüft am 19.12.2019.

BMJV (2019): Verordnung über kleine und mittlere Feuerungsanlagen. 1. Bundes Immissionsschutz Verordnung - 1. BImSchV, vom vom 26.01.2010 (BGBl. I S. 38), zuletzt geändert durch Art. 2 V v. 13.06.2019 I 804. Fundstelle: BGBl. I S. 38. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/bimschv_1_2010/BJNR003800010.html, zuletzt geprüft am 11.10.2019.

BMWi (2018a): Erneuerbare Energien in Zahlen, nationale und internationale Entwicklung im Jahr 2017. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/erneuerbare-energien-in-zahlen-2017.html>, zuletzt geprüft am 04.03.2019.

BMWi (2018b): Häufig gestellte Fragen zum Marktanzreizprogramm (MAP). Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Online verfügbar unter <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/FAQ/Marktanzreizprogramm-MAP/faq-marktanzreizprogramm-map.html>, zuletzt geprüft am 26.08.2019.

BMWi (2019): Entwurf des integrierten nationalen Energie- und Klimaplanes. Online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwurf-des-integrierten-nationalen-energie-und-klimaplanes.pdf?__blob=publicationFile&v=12, zuletzt geprüft am 19.11.2019.

Bortz, J. (2005): Statistik für Human- und Sozialwissenschaftler. 6. Aufl. Heidelberg: Springer Medizin Verlag.

BSR (2011): Bayrisches Energiekonzept: Energie innovativ. Bayrische Staatsregierung. Online verfügbar unter https://www.stmwi.bayern.de/fileadmin/user_upload/stmwi/Publikationen/2014/Bayerisches_Energiekonzept.pdf, zuletzt geprüft am 09.04.2019.

VDI 3807, 2013: Characteristic consumption values for buildings, Fundamentals, part 1.

Coffin, G. (2014): Use of by-product wood chips and other biomass in a combined heat and power system at the University of Missouri Power Plant. In: F. X. Aguilar (Hg.): Wood Energy in Developed Economies. Resource Management, Economics and Policy: Routledge, S. 253–278.

Couture, S.; Garcia, S.; Reynaud, A. (2012): Household energy choices and fuelwood consumption: An econometric approach using French data. In: *Energy Economics* (34), S. 1972–1981. DOI: 10.1016/j.eneco.2012.08.022.

DEPI (2016): Heizen mit Holzbriketts, Produktion Handel Verbrennung. Deutsches Pelletinstitut GmbH. Online verfügbar unter http://backup.depi.de/media/filebase/files/infothek/DEPI-Ver%C3%B6ffentlichungen/DEPI_Brikettbroschu%CC%88re_A5_web.pdf, zuletzt geprüft am 29.11.2019.

DEPI (2019): Pelletfeuerungen in Deutschland. DEPI auf Basis von Biomasseatlas.de, ZIV, HKI, BDH. Online verfügbar unter <https://depv.de/de/p/Hohe-Produktion-von-Holzpellets-2017-Absatz-von-Feuerungen-moderat-gestiegen-sLKukZWW5spxTpGPQvHkrZ>, zuletzt geprüft am 16.05.2019.

DEPV (2019): Pelletproduktion und Inlandsbedarf in Deutschland, 2005-2011. Online verfügbar unter <https://www.pelletshome.com/pellets-news/deutschland-groster-pelletproduzent-in-europa>, zuletzt geprüft am 18.07.2019.

Destatis (2017): Preise, Daten zur Energiepreisentwicklung, Lange Reihe von Januar 2000 bis April 2017. Statistisches Bundesamt (5619001171045).

Destatis (2019): Haushalte und Familien. Haushalt. Online verfügbar unter <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Bevoelkerung/Haushalte-Familien/Glossar/haushalt.html>, zuletzt geprüft am 07.12.2019.

Döring, P.; Glasenapp, S.; Mantau, U. (2016): Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2014. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Informationssysteme für Rohstoffe; Universität Hamburg. Hamburg (Rohstoffmonitoring Holz).

Döring, P.; Glasenapp, S.; Mantau, U. (2017a): Holz- und Zellstoffindustrie 2015. Entwicklung der Produktionskapazität und Holzrohstoffnutzung, Zwischenbericht. Universität Hamburg; Informationssysteme für Rohstoffe (Rohstoffmonitoring Holz).

Döring, P.; Glasenapp, S.; Mantau, U. (2017b): Holzwerkstoffindustrie 2015. Entwicklung der Produktionskapazität und Holzrohstoffnutzung, Abschlussbericht (Rohstoffmonitoring Holz).

Döring, P.; Glasenapp, S.; Mantau, U. (2017c): Sägeindustrie 2015. Einschnitt- und Produktionsvolumen, Zwischenbericht. Universität Hamburg; Informationssysteme für Rohstoffe (Rohstoffmonitoring Holz).

Döring, P.; Glasenapp, S.; Weimar, H.; Mantau, U. (2018a): Die energetische Nutzung von Holz in Biomassefeuerungsanlagen unter 1 MW in Nichthaushalten im Jahr 2016. Teilbericht. Universität Hamburg; Informationssysteme für Rohstoffe (Rohstoffmonitoring Holz).

Döring, P.; Weimar, H.; Mantau, U. (2018b): Einsatz von Holz in Biomasse-Großfeuerungsanlagen 2016. Universität Hamburg; Informationssysteme für Rohstoffe (Rohstoffmonitoring Holz).

Douthitt, R. A. (1989): An economic analysis of the demand for residential space heating fuel in Canada. In: *Energy* (14 Issue 4), S. 187–197. DOI: 10.1016/0360-5442(89)90062-5.

DWD (2017): Klimafaktoren für den Energieausweis. Deutscher Wetterdienst. Online verfügbar unter <https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimafaktoren/klimafaktoren.html>, zuletzt geprüft am 08.10.2019.

Egger, C.; Öhlinger, C.; Dell, G. (2014): Successful wood energy development and implementation: sustainable heating in Upper Austria. In: F. X. Aguilar (Hg.): *Wood Energy in Developed Economies. Resource Management, Economics and Policy*: Routledge, S. 279–305.

EN 14961-5:2011: Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 5: Firewood for non-industrial use; German version EN.

Ericsson, K.; Huttunen, S.; Nilsson, L. J.; Svenningsson, P. (2004): Bioenergy policy and market development in Finland and Sweden. In: *Energy Policy* (32 Issue 15), S. 1707–1721. DOI: 10.1016/S0301-4215(03)00161-7.

EU (2009): Directive 2009/28/EC of the European Parliament and of the Council. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:140:0016:0062:en:PDF>, zuletzt geprüft am 13.09.2019.

EU (2018): Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Governance of the Energy Union and Climate Action, amending Regulations (EC) No 663/2009 and (EC) No 715/2009 of the European Parliament and of the Council, Directives 94/22/EC, 98/70/EC, 2009/31/EC, 2009/73/EC, 2010/31/EU, 2012/27/EU and 2013/30/EU of the European Parliament and of the Council, Council Directives 2009/119/EC and (EU) 2015/652 and repealing Regulation (EU) No 525/2013 of the European Parliament and of the Council, PE/55/2018/REV/1. In: *Official Journal of the European Union* (L 328), S. 1–77. Online verfügbar unter <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32018R1999&from=DE>, zuletzt geprüft am 06.12.2019.

Eurostat (2019a): Erzeugung von Elektrizität und abgeleiteter Wärme nach Brennstoff. [nrg_bal_peh]. Online verfügbar unter <http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>, zuletzt geprüft am 18.10.2019.

Eurostat (2019b): Versorgung, Umwandlung, Verbrauch - erneuerbare Energien - jährliche Daten. [nrg_107a]. Online verfügbar unter <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>, zuletzt geprüft am 29.08.2019.

FAO (2015): Global Forest Resource Assessments, Country reports 2015. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/current-assessment/country-reports/en/>, zuletzt geprüft am 20.10.2019.

FAO (2017): Yearbook of Forest Products 2015. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/3/a-i7304m.pdf>, zuletzt geprüft am 28.11.2019.

FAOSTAT (2019a): Forestry Production and Trade. Germany, Wood Charcoal, Production, Import and Export Quantity. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FQ>, zuletzt geprüft am 10.03.2019.

FAOSTAT (2019b): Forestry Production and Trade, Production Quantity, Industrial roundwood, coniferous/non-coniferous. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FQ>, zuletzt geprüft am 14.11.2019.

FAOSTAT (2019c): Forestry Production and Trade, Production Quantity, Sawlogs and veneer logs coniferous/non-coniferous. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FQ>, zuletzt geprüft am 14.11.2019.

FAOSTAT (2019d): Forestry Production and Trade, Production Quantity, Woodfuel coniferous/non-coniferous. Online verfügbar unter <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FQ>, zuletzt geprüft am 14.11.2019.

Feil, P.; Neitzel, C.; Seintsch, B.; Dieter, M. (2018): Privatwaldeigentümer in Deutschland: Ergebnisse einer bundesweiten Telefonbefragung von Personen mit und ohne Waldeigentum. In: *Landbauforsch, Appl Agric Forestry Res* (3/4 68), S. 87–130. DOI: 10.3220/LBF1538634874000.

Filippi, M. (2013): Artikel 7: Marketingaspekte der Holzverwendung im Bauwesen. In: Weimar, H., Jochem, D. (Hg.): Holzverwendung im Bauwesen – Eine Marktstudie im Rahmen der „Charta für Holz“ (Thünen Report, 9), S. 289–340.

Frondel, M.; Andor, M.; Ritter, N.; Sommer, S.; Vance, C.; Matuschek, P.; Müller, U. (2015): Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2011-2013. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung; forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische (54/09 BMWi).

Frondel, M.; Andor, M.; Ritter, N.; Tauchmann, H.; Vance, C.; Matuschek, P.; Müller, U. (2013): Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2009-2010. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung; forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische (54/09 BMWi).

Frondel, M.; Grösche, P.; Ritter, N.; Tauchmann, H.; Vance, C.; Matuschek, P.; Müller, U. (2011): Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für die Jahre 2006-2008. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung; forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische (54/09 BMWi).

Frondel, M.; Grösche, P.; Tauchmann, H.; Vance, C.; Christiansen, G.; Müller, U. (2007): Erhebung des Energieverbrauchs der privaten Haushalte für das Jahr 2005. Rheinisch-Westfälisches Institut für Wirtschaftsforschung; forsa Gesellschaft für Sozialforschung und statistische (15/06 BMWi).

Garbacz, C. (1985): Residential demand for fuelwood. In: *Energy Economics*, S. 191–193. DOI: 10.1016/0140-9883(85)90008-8.

Glaserapp, S.; Aguilar, F. X.; Mantau, U.; Weimar, H. (2019a): Energetische Holzverwendung in Haushalten : Verbrauchsmusteranalyse gibt Einblicke in das Nutzungsverhalten der Privathaushalte in Deutschland. In: *Holz Zentralblatt* (145 (38)).

Glaserapp, S.; Aguilar, F. X.; Weimar, H.; Mantau, U. (2019b): Assessment of residential wood energy consumption using German household-level data. In: *Biomass and Bioenergy* (126), S. 117–129. DOI: 10.1016/j.biombioe.2019.04.020.

Glaserapp, S.; McCusker, A. (2018): Chapter 2: Wood energy data: the joint wood energy enquiry. In: F. X. Aguilar (Hg.): Wood Energy in the ECE region. Data trends and outlook in Europe the Commonwealth of Independent States and North America (ECE/TIM/SP/42), S. 12–29.

Glaserapp, S.; Weimar, H. (2019): GHD-Festbiomasse im Wärmesektor. Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie. Hamburg (37EV16 127 0).

Greene, W. H. (2002): *Econometric Analysis*. 5. Aufl. Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall.

Hagauer, D.; Lang, B.; Nemestothy, K. P. (2008): Instruction Manual for the Calculation of Wood Fuel Parameters. Version 1.6-ENG. klima:aktiv energieholz; Österreichische Energieagentur - Austrian Energy Agency. Online verfügbar unter <https://www.klimaaktiv.at/service/tools/erneuerbare/kenndatenkalkulation.html>, zuletzt geprüft am 13.11.2019.

Hardie, I. W.; Hassan, A. A. (1986): An Econometric Analysis of Residential Demand for Fuelwood in the United States. 1980-1981. In: *Forest Science* (32 No. 4), S. 1001–1015.

Hartmann, H. (2009): Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe. In: M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer (Hg.): *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Aufl.: Springer, S. 333–461.

Hick, A.; Mantau, U. (2008): Energieholzverwendung in privaten Haushalten. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Informationssysteme für Rohstoffe; Universität Hamburg. Hamburg.

IEA (2019a): Renewable energy questionnaire. Online verfügbar unter <https://iea.blob.core.windows.net/assets/92c8e9d6-b8b1-4ecc-a0da-f3c00f5f0f42/RenQues.xlsm>, zuletzt geprüft am 04.12.2019.

IEA (2019b): Renewables annual questionnaire 2017-2021 and historical revisions. Online verfügbar unter https://iea.blob.core.windows.net/assets/92c8e9d6-b8b1-4ecc-a0da-f3c00f5f0f42/Renewables_Questionnaire_Instructions.pdf, zuletzt geprüft am 11.09.2019.

IRENA (2018): Renewable Energy Statistics 2018. The International Renewable Energy Agency. Abu Dhabi. Online verfügbar unter https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2019/Jul/IRENA_Renewable_energy_statistics_2019.pdf, zuletzt geprüft am 08.09.2019.

ISO 17225-2:2014: Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 2: Graded wood pellets.

ISO 17225-3:2014: Solid biofuels - Fuel specifications and classes - Part 3: Graded wood briquettes.

ISO 17225-4:2014: Solid biofuels - Fuel specifications and classes – Part 4: Graded wood chips.

Jarrow, R. A.; Protter, P. (2004): Structural versus reduced form models: a new information based perspective. In: *Journal of Investment Management* (2 No. 2), S. 1–10.

Jochem, D.; Weimar, H.; Bösch, M.; Mantau, U.; Dieter, M. (2015): Estimation of wood removals and fellings in Germany: a calculation approach based on the amount of used roundwood. In: *European Journal of Forest Research* (134 Issue 5), S. 869–888. DOI: 10.1007/s10342-015-0896-9.

JWEE (2019): Joint Wood Energy Enquiry, data flat file. Online verfügbar unter <https://www.unece.org/forests/jwee.html>, zuletzt aktualisiert am 13.11.2019.

Kähler, W.-M. (2011): Statistische Datenanalyse. Verfahren verstehen und mit SPSS gekonnt einsetzen. 7. Aufl.: Vieweg + Teubner Verlag; Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH 2011.

Kalbfleisch, J. D.; Prentice, R. L. (2002): The statistical analysis of failure time data. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons.

Kemmler, A.; Straßburg, S.; Seelfeldt, F.; Anders, N.; Rohde, C.; Fleiter, T. et al. (2017): Datenbasis zur Bewertung von Energieeffizienzmaßnahmen in der Zeitreihe 2005 – 2014. Prognos AG; Fraunhofer ISI; Technische Universität München (ISSN 1862-4359).

Kleiber, C.; Zeileis, A. (2017): Package AER, CRAN. Online verfügbar unter <https://cran.r-project.org/web/packages/AER/AER.pdf>, zuletzt geprüft am 15.04.2018.

Kollmann, F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 1. Aufl.: Springer.

Krajnc, N. (2015): Wood Fuels Handbook. FAO (ISBN 978-92-5-108728-2). Online verfügbar unter <https://roycestreeservice.com/wp-content/uploads/Wood-Fuels-Handbook.pdf>, zuletzt geprüft am 28.11.2019.

Leek, N. (2010): Post-consumer recovered wood. In: U. Mantau, U. Saal, K. Prins, F. Steierer, M. Lindner, H. Verkerk et al. (Hg.): EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report, S. 93–96.

Lippke, B.; Gustafson, R.; Venditti, R.; Steele, P.; Volk, T. A.; Oneil, E. et al. (2012): Comparing Life-Cycle Carbon and Energy Impacts for Biofuel, Wood Product, and Forest Management Alternatives. In: *Forest Products Journal* (62 No. 4), S. 247–257.

Lohmann, U. (1998): Holz Handbuch. 5. Aufl.: DRW-Verlag.

Lumley, T. (2018): Package survey, CRAN. Online verfügbar unter <https://cran.r-project.org/web/packages/survey/survey.pdf>, zuletzt geprüft am 17.04.2018.

Mantau, U. (2004): Holzrohstoffbilanz Deutschland. Bestandsaufnahme 2002, Abschließender Forschungsbericht. Universität Hamburg. Hamburg.

Mantau, U. (2010): Wood Resource Balance fact sheets. In: U. Mantau, U. Saal, K. Prins, F. Steierer, M. Lindner, H. Verkerk et al. (Hg.): EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report, S. 129–160.

Mantau, U. (2012): Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2010. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Universität Hamburg; Informationssysteme für Rohstoffe. Hamburg.

Mantau, U. (2013): Umsatzentwicklung energetischer Holzverwendung in Deutschland 2000 bis 2012. Informationssysteme für Rohstoffe.

Mantau, U. (2015): Wood flow analysis: Quantification of resource potentials, cascades and carbon effects. In: *Biomass and Bioenergy* (79), S. 28–38. DOI: 10.1016/j.biombioe.2014.08.013.

Mantau, U. (2019): Holzrohstoffbilanz Deutschland, Entwicklung des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987 bis 2016. Informationssysteme für Rohstoffe. Hamburg.

Mantau, U.; Gschwantner, T.; Paletto, A.; Mayr, M.; Blanke, C.; Döring, P. et al. (2016): From inventory to consumer biomass availability - the ITOC model. In: *Annals of Forest Science* (73), S. 885–894. DOI: 10.1007/s13595-016-0582-1.

Mantau, U.; Mayr, M. L.; Döring, P.; Saal, U.; Glasenapp, S.; Blanke, C. (2017): World markets for wood: status and prospects. In: R. A. Meyers (Hg.): *Encyclopedia of sustainability science and technology*. New York: Springer, S. 1–27.

Mantau, U.; Saal, U.; Prins, K.; Steierer, F.; Lindner, M.; Verkerk, H. et al. (Hg.) (2010): EU-wood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report.

Mantau, U.; Sörgel, C. (2006): Energieholzverwendung in privaten Haushalten. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Informationssysteme für Rohstoffe; Universität Hamburg. Hamburg.

McDonald, J. F.; Moffitt, R. A. (1980): The uses of Tobit analysis. In: *Rev. Econ. Stat.* (62), S. 318–321.

Meier, D. (2009): Pyrolyse. In: M. Kaltschmitt, H. Hartmann und H. Hofbauer (Hg.): *Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren*. 2. Aufl.: Springer, S. 671–709.

Mikrozensus (2008): Bauen und Wohnen. Mikrozensus - Zusatzerhebung 2006, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte. Hg. v. Statistische Bundesamt (Fachserie 5, Heft 1, 2055001069005).

Mikrozensus (2012): Bauen und Wohnen. Mikrozensus - Zusatzerhebung 2010, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte. Hg. v. Statistische Bundesamt (Fachserie 5, Heft 1, 2055001109005).

Mikrozensus (2016): Bauen und Wohnen. Mikrozensus - Zusatzerhebung 2010, Bestand und Struktur der Wohneinheiten, Wohnsituation der Haushalte. Hg. v. Statistische Bundesamt (Fachserie 5, Heft 1., 2055001109005).

Moosmüller, G. (2004): Methoden der Empirischen Wirtschaftsforschung. 1. Aufl. München: Pearson Studium.

Nieder, T. (2019): Brennholzverbrauch in der deutschen Energiebilanz ab dem Jahr 2010. Zentrum für Sonnenenergie- und Wasserstoff-Forschung Baden-Württemberg, 2019. E-Mail Korrespondenz.

Niemz, P.; Sonderegger, W. (2017): Holzphysik, Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe: Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

OECD/IEA (2018): Energy Prices and Taxes, End-Use price, Energy End-Use prices (USD/toe NCV), Households, Light fuel oil/Natural gas/Electricity. Online verfügbar unter <http://wds.iea.org>, zuletzt geprüft am 20.04.2018.

Oehmichen, K.; Röhling, S.; Dunger, K.; Gerber, K.; Klatt, S. (2017): Ergebnisse und Bewertung der alternativen WEHAM-Szenarien. In: *AFZ-Der Wald* (13/2017).

Pardo, N.; Vatopoulos, K.; Krook-Riekkola, A.; Moya, J. A.; Perez, A. (2012): Heat and cooling demand and market perspective. European Commission, Joint Research Center (JRC Scientific and Policy Reports, EUR 25381 EN. ISBN 978-92-79-25311-9).

Rao, J.N.K.; Yung, W.; Hidiroglou, M. A. (2002): Estimating Equations for the Analysis of Survey Data Using Poststratification Information. In: *Sankhya* (64 No. 2), S. 364–378.

Saal, U. (2010): Industrial wood residues. In: U. Mantau, U. Saal, K. Prins, F. Steierer, M. Lindner, H. Verkerk et al. (Hg.): EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report, S. 97–107.

Sachs, L.; Hedderich, J. (2006): Angewandte Statistik. Methodensammlung mit R. 12. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer.

Scarlat, N.; Dallemand, J.-F.; Monforti-Ferrario, F.; Banja, M.; Motola, V. (2015): Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union – An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (51), S. 969–985. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.062.

Scheftelowitz, M.; Thrän, D. (2016): Biomasse im EEG 2016. Hintergrundpapier zur Situation der Bestandsanlagen in den verschiedenen Bundesländern. Deutsches Biomasseforschungszentrum; Helmholtz Zentrum für Umweltforschung.

Schraml, U.; Härdter, U. (2002): Urbanität von Waldbesitzern und von Personen ohne Waldeigentum – Folgerungen aus einer Bevölkerungsbefragung in Deutschland. In: *Allgemeine Forst und Jagdzeitung* (173), S. 140–146.

SDG (2019a): Sustainable Development Goal 15. Protect, restore and promote sustainable use of terrestrial ecosystems, sustainably manage forests, combat desertification, and halt and reverse land degradation and halt biodiversity loss. Online verfügbar unter <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg15>, zuletzt geprüft am 08.11.2019, 10.25.

SDG (2019b): Sustainable Development Goal 7. Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all. Online verfügbar unter <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg7>, zuletzt geprüft am 13.11.2019.

Sell, J. (1997): Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten. 4. Aufl.: Baufachverlag Lignum.

Simpson, W. T. (1998): Equilibrium Moisture Content of Wood in Outdoor Locations in the United States and Worldwide. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory (Research Note, FPL-RN-0268).

Skog, K. E.; Manthy, R. S. (1989): Fuelwood use in U.S. counties. Michigan State University, Agricultural Experiment Station, East Lansing (Natural Resource Research Report, 486).

Skog, K. E.; Watterson, I. A. (1984): Residential fuelwood use in the United States. In: *Journal of Forestry* (82 No. 12), S. 742–747.

Söderberg, C.; Eckerberg, K. (2013): Rising policy conflicts in Europe over bioenergy and forestry. In: *Forest Policy and Economics* (33), S. 112–119.

Song, N.; Aguilar, F. X.; Shifley, S. R.; Goerndt, M. E. (2012): Factors affecting wood energy consumption by U.S. households. In: *Energy Economics* (34), S. 389–397. DOI: 10.1016/j.eneco.2011.12.009.

StABL (2017): Flächennutzung, Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung - Stichtag 31.12. - Kreise und kreisfr. Städte. Statistische Ämter des Bundes und der Länder (33111-01-01-4). Online verfügbar unter <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online/data;jsessionid=C0FE6238E1CE6C544A37301C0595F418.reg1?operation=statistikenVerzeichnis>, zuletzt aktualisiert am 2017, zuletzt geprüft am 07.06.2017.

StBa (2016): Privathaushalte, Haushaltsmitglieder: Deutschland, Jahre, Gemeindegrößenklassen, GENESIS-Tabelle: 12211-0101. Online verfügbar unter https://www-genesis.destatis.de/genesis/online/data;jsessionid=7B67DBE5878369532B76B8309E8D2861.tomcat_GO_2_1?operation=abruftabellenVerzeichnisAuswahl&verzeichnis=&levelindex=0&levelid=1517248421064&sortdirection=auf&selectionname=12211-0101&auswaehlen.x=12&auswaehlen.y=13, zuletzt geprüft am 13.07.2016.

Steierer, F. (2010): Energy use. In: U. Mantau, U. Saal, K. Prins, F. Steierer, M. Lindner, H. Verkerk et al. (Hg.): EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report, S. 43–55.

Ströbele, W.; Pfaffenberger, W.; Heuterkes, M. (2012): Energiewirtschaft. Einführung in Theorie und Politik. 3. Aufl. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag GmbH.

Struschka, M.; Kilgus, D.; Springmann, M.; Baumbach, G. (2008): Effiziente Bereitstellung aktueller Emissionsdaten für die Luftreinhaltung. Hg. v. Umweltbundesamt. Universität Stuttgart (205 42 322 UBA-FB 001217).

Tebert, C.; Volz, S.; Töfge, K. (2016): Ermittlung und Aktualisierung von Emissionsfaktoren für das nationale Emissionsinventar bezüglich kleiner und mittlerer Feuerungsanlagen der Haushalte und Kleinverbraucher. Endbericht - Hauptteil. Hg. v. Umweltbundesamt. Ökopoll GmbH. Hamburg (371242313-2).

TFZ (2014): Qualitätshackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4 (TFZ-Merkblatt, 14BKU002). Online verfügbar unter http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/14bku002_mb_brennstoffspezifikation_von_qualitaetshackschnitzel.pdf, zuletzt geprüft am 31.10.2019.

TFZ (2019): Feste Regenerative Energieträger Datenbank (FRED). Technologie- und Förderzentrum, Bayrisches Landesamt für Umwelt. Online verfügbar unter <https://www.fred.bayern.de/>, zuletzt geprüft am 06.12.2019.

Therneau, T. M.; Lumley, T. (2017): Package survival, CRAN. Online verfügbar unter <https://cran.r-project.org/web/packages/survival/survival.pdf>, zuletzt geprüft am 15.04.2018.

TI-WF (2019): Holzeinschlag und Rohholzverwendung. Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie. Hamburg. Online verfügbar unter www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/produktion-und-verwendung/holzeinschlag-und-rohholzverwendung/, zuletzt geprüft am 12.09.2019.

Tonn, B. E.; White, D. L. (1988): Residential electricity use, wood use, and indoor temperature: an econometric model. In: *Energy Systems and Policy* (12), S. 151–165.

UN (1987): Energy Statistics: Definitions, units of measure and conversion factors. United Nations (ST/ESA/STAT/SER.F/44).

UNECE/FAO (2010): Forest product conversion factors for the UNECE region. United Nations (Discussion paper, ECE/TIM/DP/49).

UNECE/FAO (2013): Joint Forest Sector Questionnaire definitions. Online verfügbar unter [://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/docs/JFSQ-WS/DEF-EN-JQ2013.doc](http://www.unece.org/fileadmin/DAM/timber/docs/JFSQ-WS/DEF-EN-JQ2013.doc), zuletzt geprüft am 11.09.2019.

UNSD (2018): International Recommendation for Energy Statistics (IRES). United Nations (ST/ESA/STAT/SER.M/93). Online verfügbar unter <https://unstats.un.org/unsd/energy/ires/IRES-web.pdf>, zuletzt geprüft am 28.11.2019.

UNSD (2019a): Annual Questionnaire on Energy Statistics. Online verfügbar unter <https://unstats.un.org/unsd/energystats/questionnaire/>, zuletzt geprüft am 29.10.2019.

UNSD (2019b): Energy Statistics Database. Online verfügbar unter <http://data.un.org/Explorer.aspx>, zuletzt geprüft am 29.10.2019.

Vaage, K. (2000): Heating technology and energy use: a discrete/continuous choice approach to Norwegian household energy demand. In: *Energy Economics* (22 Issue 6), S. 649–666. DOI: 10.1016/S0140-9883(00)00053-0.

- Valliant, R. (1993): Post-stratification and conditional variance estimation. In: *JASA* (88 No. 421), S. 89–96. DOI: 10.2307/2290701.
- Varian, H. R. (1992): *Microeconomic Analysis*. New York: W.W. Norton & Company.
- Verkerk, H.; Lindner, M.; Anttila, P.; Asikainen, A. (2010): The realistic supply of biomass from forests. In: U. Mantau, U. Saal, K. Prins, F. Steierer, M. Lindner, H. Verkerk et al. (Hg.): *EUwood - Real potential for changes in growth and use of EU forests*. Final report, S. 56–79.
- Volz, K. R. (2001): Wem gehört eigentlich der Wald? In: *Der Bürger im Staat* (51 Heft 1), S. 51–58.
- Wagenführ, R. (2004): *Bildlexikon Holz*. 2. Aufl.: Fachbuchverlag, Carl Hanser Verlag.
- Wagenführ, R. (2007): *Holzatlas*. 6. Aufl. Leipzig: Fachbuchverlag, Carl Hanser Verlag.
- Weimar, H.; Döring, P.; Mantau, U. (2012): *Standorte der Holzwirtschaft - Holzrohstoffmonitoring, Einsatz von Holz in Biomasse-Großfeuerungsanlagen 2011*. Abschlussbericht. Universität Hamburg. Hamburg.
- Wernicke, I. (2019): *Brennholzverbrauch in der deutschen Energiebilanz in den Jahren 2008 und 2009*. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V., Energie Verkehr Umwelt, Mohrenstraße 58, 10117 Berlin, Berlin, 2019. E-Mail Korrespondenz.
- Whiteman, A. (2017): *Bioenergy: The Achilles heel of renewable energy statistics*. United Nation Statistics Division (Energy Statistics Newsletter, 17). Online verfügbar unter https://unstats.un.org/unsd/energystats/newsletter/documents/energy_newsletter_17e.pdf, zuletzt geprüft am 22.11.2019.
- Wooldridge, J. M. (2010): *Econometric analysis of cross section and panel data*. 2. Aufl. Cambridge: MIT Press.
- Wooldridge, J. M. (2013): *Introductory Econometrics. A Modern Approach*: South-Western, Cengage Learning India Private Limited.
- Ziesing, H.-J.; Görgen, R.; Maaßen, U.; Nickel, M. (2012): *Energie in Zahlen, Arbeit und Leistungen der AG Energiebilanzen*. Online verfügbar unter <https://ag-energiebilanzen.de/35-0-Aufgaben-und-Ziele.html>, zuletzt geprüft am 04.03.2019.
- Ziesing, H.-J.; Rhode, C.; Kleeberger, H.; Hardi, L.; Frondel, M.; Janßen-Timmen, R.; Sommer, S. (2019): *Anwendungsbilanzen für die Endenergiesektoren in Deutschland in den Jahren 2013 bis 2017*. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (072/15). Online verfügbar unter [://ag-energiebilanzen.de/8-0-Anwendungsbilanzen.html](https://ag-energiebilanzen.de/8-0-Anwendungsbilanzen.html), zuletzt geprüft am 19.11.2019.
- Zimmermann, G. (1982): *Zahlen Lexikon Holz*: DRW-Verlag Stuttgart.
- ZIV (2015): *Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks für 2015*. Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks, Zentralinnungsverband. Online verfügbar unter https://www.schornsteinfeger.de/sonderdruck-2015_1.pdf?forced=true, zuletzt geprüft am 04.12.2019.

ZIV (2017): Erhebungen des Schornsteinfegerhandwerks zum Anlagenbestand in Deutschland 2017, Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks. Bundesverband des Schornsteinfegerhandwerks, Zentralinnungsverband. Online verfügbar unter <https://www.schornsteinfeger.de/sonderdruck-2017.pdf?forced=true>, zuletzt geprüft am 11.04.2019.

Anhang A: Tabellen und Abbildungen

A.I. Holzeigenschaften für europäische Holzarten.

Holzart	Darrdichte in t atro/m ³ atro			Heizwert bei u=0% in MJ/kg Standard	Differenzielles Quellmaß in %/% Änderung der Holzfeuchte		
	Standard	Min	Max		Standard	Min	Max
Nadelholz							
Abies	406	320	710	19,00	0,363	0,341	0,385
Larix	536	400	820	18,17	0,442	0,381	0,503
Picea	428	300	640	18,90	0,395	0,388	0,402
Pinus	485	300	860	18,91	0,404	0,371	0,472
Pseudotsuga	478	320	730	18,58	0,402	0,381	0,422
Laubholz							
Acer	590	480	750	17,34	0,343	0,385	0,395
Alnus	507	450	600	17,34	0,374	0,150	0,476
Betula	618	460	800	18,38	0,388	0,459	0,476
Carpinus	780	500	822	16,93	0,622	-	-
Castanea	571	470	612	^{a)} 17,68	0,382	0,378	0,388
Eucalyptus	734	660	790	^{a)} 17,68	1,092	-	-
Fagus	681	490	880	17,90	0,578	0,462	0,705
Fraxinus	654	410	820	17,75	0,442	0,428	0,455
Ostrya	^{b)} 780	^{b)} 500	^{b)} 822	^{b)} 16,93	^{b)} 0,622	-	-
Populus	423	360	560	18,10	0,415	0,358	0,482
Prunus	597	486	670	^{a)} 17,68	0,449	0,381	0,479
Quercus	673	390	930	18,02	0,458	0,261	0,685
Robinia	729	537	870	17,34	0,399	0,381	0,408
Salix	352	265	520	18,03	0,321	0,261	0,381
Sorbus	725	647	788	^{a)} 17,68	0,610	0,479	0,769
Tilia	492	320	564	^{a)} 17,68	0,492	0,482	0,499

Anmerkung: a) Mittelwert der vorhanden Daten.

b) Werte von Carpinus übernommen.

Quellen: Zimmermann 1982, Sell 1997, Lohmann 1998, Wagenführ 2004, Wagenführ 2007, Hartmann 2009, TFZ 2019

Holzart	AT	BE	BG	CY	CZ	DE	DK	EE	ES	FI	FR	GB	GR	HR	HU	IE	IT	LT	LU	LV	MT	NL	PL	PT	RO	SE	SI	SK	EU28	
Liriodendron	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Malus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Olea	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ostrya	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	6	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0
Pistacia	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Populus	0	10	1	0	0	0	0	17	0	9	0	0	0	0	6	0	0	15	0	20	0	13	3	0	3	10	0	0	3	
Prunus	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Quercus	15	44	42	39	26	36	21	1	52	0	58	39	39	31	48	34	32	7	39	1	39	58	27	43	19	8	12	24	30	
Robinia	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	3	19	0	0	0	0	0	1	0	0	0	2	0	0	2	1	
Salix	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	
Sorbus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
Tilia	0	0	3	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	1	
Ulmus	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Quelle: FAO 2015

A.III. Heizwert in Relation zum Gewicht ($HG_{i,(u)}$) in MJ/kg nach Holzsortimenten und EU28-Mitgliedsländern.

IRW und BHW stehen für industrielles Rundholz und Brennholz aus dem Wald. IRA und BHA sind Abkürzungen für industrielles Rundholz und Brennholz, das nicht aus dem Wald bezogen wird. Holzenergie aus Sekundärquellen umfasst die unverarbeiteten, festen Nebenprodukte: Hack-schnitzel und Sägespäne (HS), Schnittholzreste (SR) und Rinde (RI) sowie die Energieholzprodukte: Holzpellets (HP) und Holzbriketts (HB). Holz aus tertiären Quellen wird mit GH und Holz aus unbekanntem Quellen mit UN abgekürzt.

Land	IRW	BHW	IRA	BHA	HS	SR	RI	HP	HB	GH	UN
Belgien	14,93	14,93	15,02	15,02	14,42	14,42	14,42	16,90	16,38	14,56	14,93
Bulgarien	15,00	15,00	14,95	14,95	14,44	14,44	14,44	16,92	16,40	14,58	15,00
Dänemark	15,33	15,33	14,95	14,95	14,48	14,48	14,48	16,96	16,44	14,62	15,33
Deutschland	15,16	15,16	14,99	14,99	14,57	14,36	14,36	17,05	16,52	14,67	15,16
Estland	15,17	15,17	15,05	15,05	14,50	14,50	14,50	16,99	16,46	14,64	15,17
Finnland	15,37	15,37	15,23	15,23	14,62	14,62	14,62	17,12	16,60	14,75	15,37
Frankreich	14,85	14,85	14,94	14,94	14,39	14,39	14,39	16,86	16,34	14,52	14,85
Griechenland	14,83	14,83	14,93	14,93	14,30	14,30	14,30	16,76	16,24	14,43	14,83
Irland	15,34	15,34	15,02	15,02	14,60	14,60	14,60	17,10	16,58	14,74	15,34
Italien	14,82	14,82	14,89	14,89	14,24	14,24	14,24	16,69	16,18	14,38	14,82
Kroatien	14,73	14,73	14,90	14,90	13,95	13,95	13,95	16,36	15,86	14,08	14,73
Lettland	15,01	15,01	15,07	15,07	14,46	14,46	14,46	16,94	16,42	14,60	15,01
Litauen	15,11	15,11	15,00	15,00	14,38	14,38	14,38	16,85	16,33	14,52	15,11
Luxemburg	15,17	15,17	14,96	14,96	14,37	14,37	14,37	16,83	16,32	14,50	15,17
Malta	14,94	14,94	14,93	14,93	14,33	14,33	14,33	16,80	16,28	14,47	14,94
Niederlande	15,04	15,04	15,06	15,06	14,38	14,38	14,38	16,85	16,34	14,52	15,04
Österreich	15,24	15,24	14,90	14,90	14,56	14,56	14,56	17,06	16,54	14,70	15,24
Polen	15,22	15,22	14,97	14,97	14,49	14,49	14,49	16,98	16,46	14,63	15,22
Portugal	14,95	14,95	14,93	14,93	14,62	14,62	14,62	17,13	16,60	14,76	14,95
Rumänien	14,96	14,96	14,98	14,98	14,25	14,25	14,25	16,70	16,19	14,39	14,96
Schweden	15,36	15,36	15,19	15,19	14,63	14,63	14,63	17,14	16,62	14,77	15,36
Slowakei	15,17	15,17	14,91	14,91	14,36	14,36	14,36	16,83	16,31	14,50	15,17

Land	IRW	BHW	IRA	BHA	HS	SR	RI	HP	HB	GH	UN
Slowenien	14,85	14,85	14,90	14,90	14,54	14,54	14,54	17,04	16,51	14,68	14,85
Spanien	15,22	15,22	14,98	14,98	14,47	14,47	14,47	16,95	16,43	14,60	15,22
Tschechien	15,33	15,33	14,96	14,96	14,57	14,57	14,57	17,06	16,54	14,70	15,33
Ungarn	14,76	14,76	14,90	14,90	13,88	13,88	13,88	16,27	15,77	14,01	14,76
Vereinigtes Königreich	15,41	15,41	14,95	14,95	14,56	14,56	14,56	17,05	16,53	14,69	15,41
Zypern	15,53	15,53	14,93	14,93	14,55	14,55	14,55	17,05	16,52	14,69	15,53
EU28	15,07	15,07	14,99	14,99	14,51	14,51	14,51	17,00	16,48	14,65	15,07

A.IV. Heizwerte in Relation zum Volumen ($HV_{(u)}$) in MJ/m³ nach Holzsortimenten und EU28-Mitgliedsländern.

IRW und BHW stehen für industrielles Rundholz und Brennholz aus dem Wald. IRA und BHA sind Abkürzungen für industrielles Rundholz und Brennholz, das nicht aus dem Wald bezogen wird. Holzenergie aus Sekundärquellen umfasst die unverarbeiteten, festen Nebenprodukte: Hack-schnitzel und Sägespäne (HS), Schnittholzreste (SR) und Rinde (RI) sowie die Energieholzprodukte: Holzpellets (HP) und Holzbriketts (HB). Holz aus tertiären Quellen wird mit GH und Holz aus unbekanntem Quellen mit UN abgekürzt.

Land	IRW	BHW	IRA	BHA	HS	SR	RI	HP	HB	GH	UN
Belgien	10.259	10.259	9.921	9.921	8.125	8.125	8.125	8.847	8.704	8.167	10.259
Bulgarien	10.129	10.129	10.268	10.268	8.446	8.446	8.446	9.211	9.060	8.491	10.129
Dänemark	8.645	8.645	10.050	10.050	7.757	7.757	7.757	8.434	8.301	7.796	8.645
Deutschland	9.594	9.594	10.252	10.252	7.638	8.498	8.498	8.397	8.265	7.859	9.594
Estland	8.662	8.662	8.842	8.842	7.867	7.867	7.867	8.530	8.399	7.906	8.662
Finnland	8.999	8.999	9.519	9.519	7.780	7.780	7.780	8.438	8.308	7.819	8.999
Frankreich	10.493	10.493	10.205	10.205	8.334	8.334	8.334	9.075	8.929	8.377	10.493
Griechenland	10.488	10.488	10.195	10.195	8.673	8.673	8.673	9.542	9.369	8.724	10.488
Irland	8.748	8.748	10.102	10.102	7.316	7.316	7.316	7.932	7.811	7.352	8.748
Italien	10.242	10.242	10.002	10.002	8.473	8.473	8.473	9.252	9.098	8.519	10.242
Kroatien	10.748	10.748	10.166	10.166	9.672	9.672	9.672	10.654	10.458	9.729	10.748
Lettland	9.002	9.002	8.915	8.915	8.050	8.050	8.050	8.730	8.596	8.090	9.002
Litauen	8.724	8.724	8.863	8.863	8.089	8.089	8.089	8.774	8.639	8.129	8.724
Luxemburg	9.399	9.399	10.234	10.234	8.280	8.280	8.280	9.043	8.892	8.325	9.399
Malta	10.157	10.157	10.195	10.195	8.565	8.565	8.565	9.410	9.242	8.614	10.157
Niederlande	9.991	9.991	9.925	9.925	8.491	8.491	8.491	9.243	9.094	8.536	9.991
Österreich	8.895	8.895	10.097	10.097	7.410	7.410	7.410	8.042	7.917	7.448	8.895
Polen	9.224	9.224	9.799	9.799	8.254	8.254	8.254	8.972	8.830	8.296	9.224
Portugal	10.215	10.215	10.269	10.269	8.101	8.101	8.101	8.803	8.665	8.142	10.215
Rumänien	10.074	10.074	10.004	10.004	8.649	8.649	8.649	9.490	9.323	8.699	10.074
Schweden	8.855	8.855	9.434	9.434	7.597	7.597	7.597	8.239	8.112	7.635	8.855
Slowakei	9.312	9.312	10.230	10.230	8.267	8.267	8.267	9.033	8.881	8.312	9.312

Land	IRW	BHW	IRA	BHA	HS	SR	RI	HP	HB	GH	UN
Slowenien	10.257	10.257	10.098	10.098	7.572	7.572	7.572	8.231	8.101	7.611	10.257
Spanien	9.644	9.644	10.341	10.341	8.570	8.570	8.570	9.388	9.225	8.618	9.644
Tschechien	8.714	8.714	10.053	10.053	7.512	7.512	7.512	8.155	8.029	7.550	8.714
Ungarn	10.676	10.676	10.341	10.341	10.068	10.068	10.068	11.031	10.840	10.124	10.676
Vereinigtes Königreich	8.376	8.376	10.017	10.017	7.532	7.532	7.532	8.174	8.047	7.570	8.376
Zypern	8.691	8.691	10.280	10.280	8.298	8.298	8.298	9.042	8.895	8.342	8.691
EU28	9.705	9.705	9.965	9.965	7.953	7.953	7.953	8.647	8.510	7.994	9.705

A.V. Deskriptive Statistik zum Erfassungsjahr 2005.

Jahr	2005					
Anzahl der Nennungen	n=8.202					
Variablenbezeichnung	Min	Max	Mittelw.	SF ²⁶	Gew. Mittelw.	Gew. SF ²⁶
EH	0	70,6	0,778	0,034	0,747	0,035
ZH = 1	0	1	0,021	0,002	0,019	0,002
WF	10	1.000	107,4	0,780	106,5	0,820
FJ	1571	2005	1961	0,400	1962	0,420
WA: Mieter in Mehrfamilienhaus	0	1	0,420	0,005	0,414	0,006
WA: Eigentümer in Mehrfamilienhaus	0	1	0,103	0,003	0,110	0,004
WA: Eigentümer in Ein-/Zweifamilienhaus	0	1	0,366	0,005	0,358	0,006
WA: Mieter in Ein-/Zweifamilienhaus	0	1	0,112	0,004	0,119	0,004
AP	891	891	891	-	891	-
WB	0	1	0,022	0,002	0,021	0,002
UB: < 5.000 Einwohner	0	1	0,158	0,004	0,146	0,004
UB: 5.000 – 19.999 Einwohner	0	1	0,217	0,005	0,237	0,005
UB: 20.000 – 49.999 Einwohner	0	1	0,164	0,004	0,172	0,004
UB: 50.000 – 99.999 Einwohner	0	1	0,094	0,003	0,100	0,004
UB: 100.000 – 499.999 Einwohner	0	1	0,177	0,004	0,182	0,005
UB: ≥ 500.000 Einwohner	0	1	0,189	0,004	0,165	0,004
WD	0	0,60	0,242	0,002	0,249	0,002
GT	2.942	5.177	3.624	3,500	3.607	3,700
ST: Norden	0	1	0,180	0,004	0,183	0,005
ST: Westen	0	1	0,314	0,005	0,352	0,006
ST: Süden	0	1	0,240	0,005	0,268	0,005
ST: Osten	0	1	0,266	0,005	0,197	0,005
HG: 1 Person	0	1	0,308	0,005	0,362	0,006
HG: 2 Personen	0	1	0,362	0,005	0,342	0,006
HG: 3 Personen	0	1	0,157	0,004	0,144	0,004
HG: 4 Personen	0	1	0,135	0,004	0,112	0,004
HG: ≥ 5 Personen	0	1	0,039	0,002	0,040	0,002
NE: < 1.000 Euro	0	1	0,098	0,003	0,107	0,004
NE: 1.000 – 1.999 Euro	0	1	0,407	0,005	0,422	0,006
NE: 2.000 – 2.999 Euro	0	1	0,322	0,005	0,309	0,005
NE: 3.000 – 3.999 Euro	0	1	0,127	0,004	0,120	0,004
NE: ≥ 4.000 Euro.	0	1	0,046	0,002	0,042	0,002
AL	19	95	51	0,160	52	0,180
Gewichte	0,3	2,6	0,879	0,004	-	-

Quelle: Glasenapp et al. 2019b

²⁶ Standardfehler für metrische Variablen wurden nach $SF_m = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n(n-1)}}$ und für binäre Variablen nach $SF_b = \sqrt{\frac{\bar{x}(1-\bar{x})}{n}}$ berechnet (Bortz 2005).

A.VI. Deskriptive Statistik zum Erfassungsjahr 2010.

Jahr	2010					
Anzahl der Nennungen	n=6.371					
Variablenbezeichnung	Min	Max	Mittelw.	SF²⁶	Gew. Mittelw.	Gew. SF²⁶
EH	0	148,4	1,414	0,068	1,193	0,064
ZH = 1	0	1	0,036	0,002	0,028	0,002
WF	20	800	105,5	0,660	100,2	0,610
FJ	1400	2010	1962	0,470	1963	0,440
WA: Mieter in Mehrfamilienhaus	0	1	0,367	0,006	0,402	0,006
WA: Eigentümer in Mehrfamilienhaus	0	1	0,099	0,004	0,114	0,004
WA: Eigentümer in Ein-/Zweifamilienhaus	0	1	0,432	0,006	0,375	0,006
WA: Mieter in Ein-/Zweifamilienhaus	0	1	0,102	0,004	0,109	0,004
AP	1.148	1.148	1.148	-	1.148	-
WB	0	1	0,033	0,002	0,026	0,002
UB: < 5.000 Einwohner	0	1	0,180	0,005	0,144	0,004
UB: 5.000 – 19.999 Einwohner	0	1	0,241	0,005	0,244	0,005
UB: 20.000 – 49.999 Einwohner	0	1	0,169	0,005	0,170	0,004
UB: 50.000 – 99.999 Einwohner	0	1	0,097	0,004	0,101	0,004
UB: 100.000 – 499.999 Einwohner	0	1	0,196	0,005	0,173	0,005
UB: ≥ 500.000 Einwohner	0	1	0,117	0,004	0,167	0,004
WD	0	0,60	0,258	0,002	0,252	0,002
GT	3.459	5.641	4.136	3,600	4.090	3,400
ST: Norden	0	1	0,164	0,005	0,183	0,005
ST: Westen	0	1	0,287	0,006	0,344	0,006
ST: Süden	0	1	0,251	0,005	0,275	0,005
ST: Osten	0	1	0,299	0,006	0,198	0,005
HG: 1 Person	0	1	0,247	0,005	0,387	0,006
HG: 2 Personen	0	1	0,420	0,006	0,348	0,006
HG: 3 Personen	0	1	0,161	0,005	0,130	0,004
HG: 4 Personen	0	1	0,133	0,004	0,099	0,004
HG: ≥ 5 Personen	0	1	0,039	0,002	0,035	0,002
NE: < 1.000 Euro	0	1	0,085	0,004	0,108	0,004
NE: 1.000 – 1.999 Euro	0	1	0,332	0,006	0,369	0,006
NE: 2.000 – 2.999 Euro	0	1	0,314	0,006	0,292	0,005
NE: 3.000 – 3.999 Euro	0	1	0,171	0,005	0,150	0,004
NE: ≥ 4.000 Euro.	0	1	0,097	0,004	0,082	0,003
AL	18	98	53	0,180	53	0,190
Gewichte	0,2	3,4	1,131	0,008	-	-

Quelle: Glasenapp et al. 2019b

A.VII. Deskriptive Statistik zum Erfassungsjahr 2014.

Jahr	2014					
Anzahl der Nennungen	n=7.043					
Variablenbezeichnung	Min	Max	Mittelw.	SF²⁶	Gew. Mittelw.	Gew. SF²⁶
EH	0	71,3	0,894	0,038	0,785	0,035
ZH = 1	0	1	0,031	0,002	0,024	0,002
WF	12	600	102,5	0,570	99,9	0,570
FJ	1500	2014	1963	0,460	1963	0,460
WA: Mieter in Mehrfamilienhaus	0	1	0,372	0,006	0,396	0,006
WA: Eigentümer in Mehrfamilienhaus	0	1	0,125	0,004	0,133	0,004
WA: Eigentümer in Ein-/Zweifamilienhaus	0	1	0,412	0,006	0,372	0,006
WA: Mieter in Ein-/Zweifamilienhaus	0	1	0,091	0,003	0,100	0,004
AP	1.322	1.322	1.322	-	1.322	-
WB	0	1	0,022	0,002	0,018	0,002
UB: < 5.000 Einwohner	0	1	0,164	0,004	0,136	0,004
UB: 5.000 – 19.999 Einwohner	0	1	0,239	0,005	0,249	0,005
UB: 20.000 – 49.999 Einwohner	0	1	0,176	0,005	0,177	0,005
UB: 50.000 – 99.999 Einwohner	0	1	0,094	0,004	0,095	0,004
UB: 100.000 – 499.999 Einwohner	0	1	0,166	0,004	0,166	0,004
UB: ≥ 500.000 Einwohner	0	1	0,162	0,004	0,177	0,005
WD	0	0,60	0,254	0,002	0,255	0,002
GT	2.512	4.825	3.148	3,400	3.113	3,300
ST: Norden	0	1	0,197	0,005	0,184	0,005
ST: Westen	0	1	0,287	0,005	0,344	0,006
ST: Süden	0	1	0,241	0,005	0,280	0,005
ST: Osten	0	1	0,276	0,005	0,192	0,005
HG: 1 Person	0	1	0,272	0,005	0,396	0,006
HG: 2 Personen	0	1	0,450	0,006	0,351	0,006
HG: 3 Personen	0	1	0,145	0,004	0,127	0,004
HG: 4 Personen	0	1	0,104	0,004	0,094	0,003
HG: ≥ 5 Personen	0	1	0,029	0,002	0,033	0,002
NE: < 1.000 Euro	0	1	0,090	0,003	0,110	0,004
NE: 1.000 – 1.999 Euro	0	1	0,336	0,006	0,362	0,006
NE: 2.000 – 2.999 Euro	0	1	0,320	0,006	0,302	0,005
NE: 3.000 – 3.999 Euro	0	1	0,160	0,004	0,144	0,004
NE: ≥ 4.000 Euro.	0	1	0,093	0,004	0,082	0,003
AL	18	94	56	0,160	54	0,180
Gewichte	0,3	3,1	1,023	0,006	-	-

Quelle: Glasenapp et al. 2019b

A.VIII. Prüfung auf Endogenität.

Variablenbezeichnung	Regressions- koeffizient	Standard- fehler	p-Wert
Achsenabschnitt	6,890	6,56E+00	2,93E-01
ZH: Ja	-1,090	5,76E-01	5,87E-02
WF	0,009	5,23E-03	9,97E-02
FJ	-0,003	2,32E-03	1,56E-01
WA: Mieter in Mehrfamilienhaus	1,097	1,43E+00	4,43E-01
WA: Eigentümer in Ein-/Zweifamilienhaus	-1,447	1,01E+00	1,54E-01
WA: Mieter in Ein-/Zweifamilienhaus	-0,368	1,17E+00	7,53E-01
AP	-0,001	3,17E-03	8,42E-01
WB: Ja	0,923	3,83E-01	1,59E-02
UB: 5.000 – 19.999 Einwohner	-0,088	2,60E-01	7,36E-01
UB: 20.000 – 49.999 Einwohner	0,191	3,38E-01	5,71E-01
UB: 50.000 – 99.999 Einwohner	0,275	4,64E-01	5,53E-01
UB: 100.000 – 499.999 Einwohner	0,013	4,46E-01	9,77E-01
UB: ≥ 500.000 Einwohner	0,304	5,85E-01	6,03E-01
WD	-0,292	8,84E-01	7,41E-01
GT	0,000	3,97E-04	9,72E-01
ST: Westen	-0,341	2,30E+00	8,82E-01
ST: Süden	-1,114	2,22E+00	6,16E-01
ST: Osten	0,464	2,15E+00	8,29E-01
HG: 2 Personen	1,174	8,51E-01	1,67E-01
HG: 3 Personen	0,811	9,46E-01	3,92E-01
HG: 4 Personen	0,987	9,93E-01	3,20E-01
HG: ≥ 5 Personen	-0,008	1,25E+00	9,95E-01
NE: 1.000 – 1.999 Euro	-0,498	2,06E+00	8,09E-01
NE: 2.000 – 2.999 Euro	-0,858	2,04E+00	6,74E-01
NE: 3.000 – 3.999 Euro	-1,737	2,06E+00	4,00E-01
NE: ≥ 4.000 Euro.	-1,117	2,13E+00	5,99E-01
AL	-0,010	9,52E-03	2,73E-01
WF x HG: 2 Personen	-0,008	5,96E-03	1,94E-01
WF x HG: 3 Personen	-0,004	6,34E-03	5,24E-01
WF x HG: 4 Personen	-0,004	6,48E-03	5,06E-01
WF x HG: ≥ 5 Personen	0,002	7,62E-03	7,50E-01
ST: Westen x NE: 1.000 – 1.999 Euro	0,452	2,41E+00	8,51E-01
ST: Süden x NE: 1.000 – 1.999 Euro	1,262	2,31E+00	5,85E-01
ST: Osten x NE: 1.000 – 1.999 Euro	0,384	2,24E+00	8,64E-01
ST: Westen x NE: 2.000 – 2.999 Euro	0,317	2,36E+00	8,93E-01
ST: Süden x NE: 2.000 – 2.999 Euro	0,673	2,27E+00	7,67E-01
ST: Osten x NE: 2.000 – 2.999 Euro	-0,946	2,22E+00	6,70E-01
ST: Westen x NE: 3.000 – 3.999 Euro	0,591	2,39E+00	8,05E-01
ST: Süden x NE: 3.000 – 3.999 Euro	1,632	2,30E+00	4,78E-01
ST: Osten x NE: 3.000 – 3.999 Euro	-0,057	2,28E+00	9,80E-01
ST: Westen x NE: ≥ 4.000 Euro.	-0,348	2,46E+00	8,87E-01
ST: Süden x NE: ≥ 4.000 Euro.	0,424	2,37E+00	8,58E-01
ST: Osten x NE: ≥ 4.000 Euro.	-1,618	2,41E+00	5,03E-01

Variablenbezeichnung	Regressions- koeffizient	Standard- fehler	p-Wert
Jahr: 2010 × ZH	0,163	7,49E-01	8,28E-01
Jahr: 2014 × ZH	1,082	7,56E-01	1,52E-01
Jahr: 2010 × WF	0,001	4,18E-03	8,07E-01
Jahr: 2014 × WF	-0,009	4,77E-03	6,27E-02
Jahr: 2010 × WA: Mieter in Mehrfamilienhaus	2,716	1,64E+00	9,83E-02
Jahr: 2010 × WA: Eigentümer in Ein- /Zweifamilienhaus	-0,775	1,02E+00	4,49E-01
Jahr: 2010 × WA: Mieter in Ein-/Zweifamilienhaus	-0,114	1,25E+00	9,27E-01
Jahr: 2014 × WA: Mieter in Mehrfamilienhaus	0,721	1,89E+00	7,03E-01
Jahr: 2014 × WA: Eigentümer in Ein- /Zweifamilienhaus	0,492	1,27E+00	6,99E-01
Jahr: 2014 × WA: Mieter in Ein-/Zweifamilienhaus	0,255	1,51E+00	8,66E-01

A.IX. Prüfung der Normalverteilungsannahme.

Die Normalverteilungsannahme wurde für $E(y|x, y > 0)$ geprüft. In Abbildung A.IX.I ist die Verteilung des Fehlerterms als Histogramm und die dazugehörige Normalverteilung in rot angegeben (Wooldridge 2010, Kähler 2011). Der Mittelwert des Fehlerterms liegt bei -2,13 und die Standardabweichung bei 6,90.

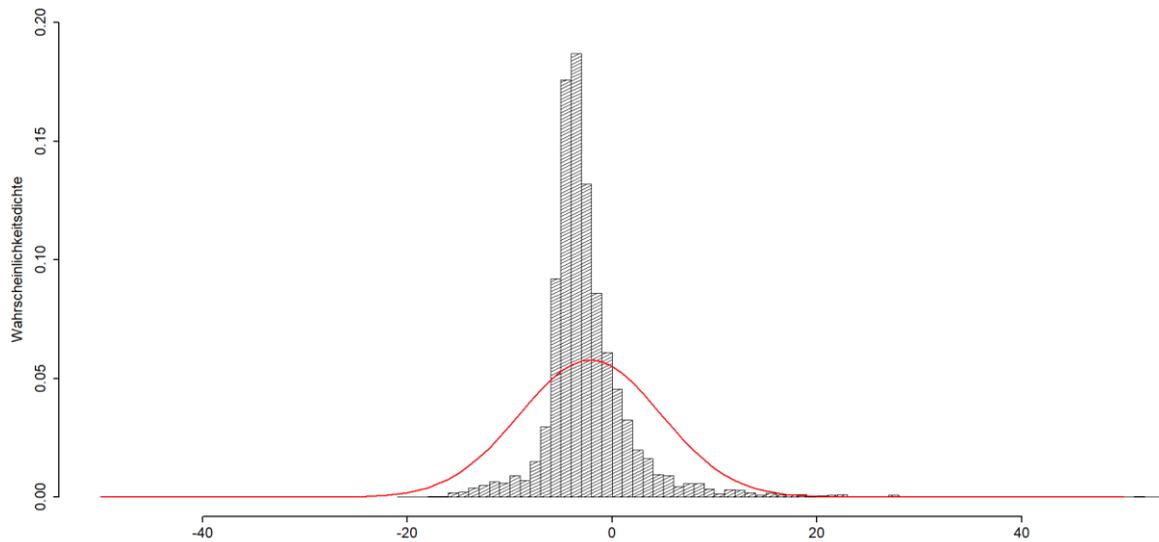


Abbildung A.IX.I: Histogramm des Fehlerterms und die dazugehörige Normalverteilung in rot

A.X. Pearson Korrelationsmatrix in %.

Zur besseren Darstellbarkeit sind die unabhängigen Variablen als Zahlenwerte angegeben: ZH = (1), WF = (2), FJ = (3), WA: Mieter in Mehrfamilienhaus = (4), WA: Eigentümer in Ein-/Zweifamilienhaus = (5), WA: Mieter in Ein-/Zweifamilienhaus = (6), AP = (7), WB = (8), UB: 5.000 – 19.999 Einwohner = (9), UB: 20.000 – 49.999 Einwohner = (10), UB: 50.000 – 99.999 Einwohner = (11), UB: 100.000 – 499.999 Einwohner = (12), UB: ≥ 500.000 Einwohner = (13), WD = (14), GT = (15), ST: Westen = (16), ST: Süden = (17), ST: Osten = (18), HG: 2 Personen = (19), HG: 3 Personen = (20), HG: 4 Personen = (21), HG: ≥ 5 Personen = (22), NE: 1.000 – 1.999 Euro = (23), NE: 2.000 – 2.999 Euro = (24), NE: 3.000 – 3.999 Euro = (25), NE: ≥ 4.000 Euro. = (26) und AL = (27).

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)
(1)	100																										
(2)	13	100																									
(3)	-6	0	100																								
(4)	-13	-43	-3	100																							
(5)	16	50	2	-65	100																						
(6)	-2	-1	-6	-27	-28	100																					
(7)	3	-3	2	-4	4	-3	100																				
(8)	25	11	-7	-10	14	-3	0	100																			
(9)	3	13	3	-16	15	6	2	3	100																		
(10)	-4	1	3	-3	0	2	1	-3	-25	100																	
(11)	-4	-3	0	3	-4	0	0	-3	-18	-15	100																
(12)	-6	-12	1	18	-17	-6	-1	-5	-26	-21	-15	100															
(13)	-7	-16	-4	24	-21	-8	-4	-6	-24	-20	-14	-20	100														
(14)	12	13	-2	-16	14	6	4	10	25	9	-1	-19	-36	100													
(15)	9	5	-2	-5	8	1	-30	9	9	-5	-2	-7	-17	21	100												
(16)	-6	8	0	-8	4	5	-3	-3	1	6	7	6	-4	5	-29	100											
(17)	6	8	7	-11	3	4	0	6	14	-2	-3	-6	-13	24	17	-37	100										
(18)	4	-17	-8	22	-10	-10	1	1	-12	-4	-5	1	10	-2	18	-40	-35	100									
(19)	-1	-1	-1	-1	1	-1	8	0	-2	0	3	0	-1	-2	-1	-3	-6	8	100								
(20)	3	11	-1	-10	11	1	-1	2	3	0	-2	-3	-6	5	3	1	3	-1	-35	100							

	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)	(15)	(16)	(17)	(18)	(19)	(20)	(21)	(22)	(23)	(24)	(25)	(26)	(27)
(21)	5	20	5	-17	20	1	-4	5	6	0	-2	-6	-7	6	4	3	5	-8	-31	-16	100						
(22)	5	15	1	-11	13	1	-2	3	5	-1	-1	-3	-6	4	5	1	6	-6	-16	-8	-7	100					
(23)	-1	-19	-7	17	-18	2	-7	-1	-3	0	0	1	4	-2	2	-4	-5	9	-3	-10	-15	-8	100				
(24)	1	8	1	-10	9	-1	0	0	1	1	-1	-1	-2	1	-1	1	2	-5	9	8	7	2	-52	100			
(25)	2	16	6	-15	15	0	4	2	3	0	1	-2	-4	2	-1	5	4	-9	4	7	12	7	-32	-29	100		
(26)	0	19	7	-14	16	-2	8	2	3	-1	-1	-1	-2	2	0	4	6	-9	1	6	10	7	-22	-20	-12	100	
(27)	-1	-6	-3	1	2	-8	13	1	-6	0	3	4	4	-5	-6	-4	-11	12	26	-16	-21	-11	11	-1	-10	-4	100

Anhang B: Manuskript

Conversion factors for residential wood energy consumption prelude harmonization of forest products and energy statistics

Abstract

Forest products as well as energy statistics gather wood energy data. However, statistics show different level of detail in information provided. Integration of both statistics can be beneficial for data quality and policy making but requires universal conversion factors to ensure data consistency. For the residential sectors of EU28 member states, we provide conversion factors relative to weight and volume, which consider differences in forest products' properties. Considered forest products included wood from primary, secondary and tertiary sources.

Factors relative to weight range from 13.88 to 17.14 MJ/kg and require information on moisture content and lower heating value. Factors relative to volume require additional information on basic density and volume change and range from 7,316 to 11,031 MJ/m³. Variations in conversion factors can cause inconsistent conversion results, which reveal importance of accounting for forest product specific information.

Comparison of residential wood energy use in forest products and energy statistics for entire EU28 indicate minor inconsistencies between forest products and energy statistics. Better collaboration at national level and the use of universal conversion factors will likely improve comparability of statistics. Conversion factors for the residential sector can potentially facilitate conversion in the non-residential sector too. However, liquid biofuels (e.g., black liquor) which aren't used in the residential sector denote an exception. In addition, moisture content of some forest products might be different in the non-residential sector, which needs to be accounted for when computing factors for this sector.

Keywords: conversion factor, forest products, official statistics, residential sector, renewable energy

Introduction

Energy from renewable sources has been important in global energy consumption and will maintain its importance in the future (Scarlat et al. 2015, BMWi 2018, SDG 2019b). Within the EU28²⁷, solid biofuel, inclusive of woody and non-woody biomass, accounted for 72% in gross heat production from renewable energy sources in 2016. The share in gross electricity production from renewables was lower at 9%, due to relative importance of wind energy. In final consumption, solid biofuels denoted the most important renewable energy source. In 2016, 77% of final renewable energy consumption derived from solid biofuels in EU28. The residential sector accounted for 63% of final solid biofuel use (Eurostat 2019a, Eurostat 2019b).

Data providers to energy statistics submit bioenergy data in an aggregated form. Little or no information is provided on specific wood energy product types (e.g. split logs, chips and particles, wood residues, bark) or the share of non-woody biomass in solid biofuels (e.g. straw, nut shells) (IEA 2009, UNSD 2019a). This lack of information hampers the evaluation of wood energy demand on sustainable forest management or on the raw materials supply for other wood processing industries (Mantau et al. 2010). In addition, European regulation 2018/1999, which succeeds directive 2009/28/EC, will require that EU countries provide more detailed information on wood energy sources in future energy reporting (EU 2018).

Statistical databases for forest products such as FAO (2019) provide detailed information on production and trade of wood resources. However, there is a lack of information that differentiate the end-use of forest products that are utilized as raw materials e.g., wood chips for pulp production or wood chips for producing energy. At the direction of the UNECE member states, this shortcoming was addressed in 2005 with the UNECE/FAO Joint Wood Energy Enquiry (JWEE), which gathers detailed information on wood energy consumption (Glaserapp and McCusker 2018).

Data taken from forest products statistics can improve energy statistics. In Germany, the Working Group on Renewable Energy Statistics (AGEE-Stat) provides official information on renewable energies. AGEE-Stat made an initial attempt to integrate German forest products and energy statistics, however, differences in measurement units and assumptions relative to wood properties have proven to be challenging. For instance, statistics on forest products indicate data in volume or weight (UNECE/FAO 2010) while the energy statistics commonly use energy content at lower heating value as a unit of measure (UNSD 2018). Variation in the basic density, moisture content and heating value of woody raw materials makes it challenging to convert between energy units and volumetric or weight units. Although some have already provided conversion factors (Hagauer et al. 2008, Hartmann 2009, Krajnc 2015, UNSD 2018), their use in forest products statistics is limited due to a lack of consistency with relevant forest products. In addition, Whiteman (2017) noted lack of knowledge on factors affecting conversion factors and lack of knowledge on ranges of potential factors among national correspondents to energy statistics.

In this paper, we present a comprehensive overview on the forest products used for energy conversion and propose approaches to integrate energy and forest product statistics for one

²⁷ EU28 comprises Austria, Belgium, Bulgaria, Croatia, Cyprus, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Ireland, Italy, Latvia, Lithuania, Luxembourg, Malta, Netherlands, Poland, Portugal, Romania, Slovak Republic, Slovenia, Spain, Sweden and United Kingdom

of the largest wood energy consumer, the residential sector. In addition, we will show how assumptions on moisture content and shares of coniferous and non-coniferous wood affect results. We demonstrate computation of conversion factors at national level for Germany and use this approach to estimate a set of conversion factors for the entire EU28 region. There will also be discussion of wood energy use in the non-residential sector identifying the challenges when using conversion factors, which were developed for the residential sector. The results aim to combine information from energy and forest products statistics to improve for the accuracy of wood energy-related data and research.

Methods

Converting between energy units and the units used to measure forest products requires accounting for a host of variables, such as basic density, moisture content, volume change and lower heating value (Hartmann 2009). Basic density refers to the ratio of weight and volume. Oven dry density (ρ_0) goes further by refining this ratio in an oven dry state (dm), whereas density in a wet state (ρ_u) denotes the ratio at given moisture content. Moisture content (u) represents the ratio of the weight of water divided by the dry weight of wood and will be used as such unless otherwise noted. For most tree species, when moisture contained in wood drops below the saturation point ($u < 30\%$), wood volume will shrink. Wood volume that has already shrunk can swell when exposed to moisture. Differential volume swelling (β_v) denotes a measure for average volume change at incremental moisture content. Lower heating value ($H_{i,(u)}$) refers to the useable energy output from combustion of wood, exclusive of energy for water evaporation. During combustion, water contained in the wood cells is vaporized and absorbs energy in combustion. In addition, wood that contains no moisture at all will give off water vapour, also absorbing energy, as a product of the reaction of molecular hydrogen. Exclusion of energy for water evaporation distinguishes lower heating value from higher heating value (Kollmann 1951, Hartmann 2009, Niemz and Sonderegger 2017).

Oven dry density (ρ_0), differential volume swelling (β_v) and lower heating value ($H_{i,(u=0)}$) exhibit variation among wood species (Kollmann 1951, Sell 1997, Lohmann 1998, Wagenführ 2004, Wagenführ 2007, Niemz and Sonderegger 2017). Table 1 shows properties of coniferous (C) and non-coniferous (NC) wood in Germany and EU28 member states. Properties were calculated from individual wood species. Growing stock composition by wood species denoted weights to compute averages for coniferous and non-coniferous wood. A detailed list of growing stock's wood species composition and properties is presented in an Appendix A following an extensive literature review (Zimmermann 1982, Sell 1997, Lohmann 1998, Wagenführ 2004, Wagenführ 2007, Hartmann 2009, FAO 2015).

Table 1: Wood properties by region and wood species.

property	unit	statistic	Germany		EU28	
			C	NC	C	NC
oven dry density, ρ_0	kg dm/m ³ dm	min	306	454	304	449
		standard	453	678	457	651
		max	729	898	752	843
lower heating value, $H_{i,(u=0)}$	MJ/kg dm	standard	18.9	17.9	18.9	17.9
volume swelling, β_v	%/%u	min	0.380	0.389	0.378	0.395
		standard	0.399	0.534	0.399	0.496
		max	0.430	0.698	0.437	0.629

Source: Zimmermann 1982, Sell 1997, Lohmann 1998, Wagenführ 2004, Wagenführ 2007, Hartmann 2009, FAO 2015, TFZ 2019

Coniferous wood shows lower ρ_0 values compared to non-coniferous wood due to structural differences inside the wood (Niemz and Sonderegger 2017). Basic density of non-coniferous wood is slightly higher in Germany as compared to EU28, presumably because of the larger shares of beech in German, respectively birch in EU28 growing stock compositions (FAO 2015). Lower heating value at $u = 0\%$ ($H_{i,(u=0)}$) denote identical values in Germany and EU28. In general, coniferous wood shows higher energy content compared to non-coniferous wood because of higher content of lignin and volatile organic compounds (Krajnc 2015). In Germany and EU28, differential volume swelling of non-coniferous wood is larger compared to coniferous wood.

Despite varying properties between species of wood, forest products statistics often do not distinguish between wood species. However, statistics provide information on wood sources, which can be used to estimate forest products' compositions of coniferous and non-coniferous wood (FAO 2017, Glasenapp and McCusker 2018). Table 2 presents forest products, which are used for energy conversion in the residential sector, inclusive of assumptions on the share of coniferous wood and average moisture content (u) in percent.

Table 2: Forest products for energy conversion in the residential sector and corresponding shares of coniferous wood by species and assumptions over moisture content.

category	forest product	C ²⁸ in %		u in %
		Germany	EU28	
primary source	forests			
	industrial roundwood	42	30	11..18..25
	fuelwood	42	30	11..18..25
	non-forestlands			
secondary source	industrial roundwood	20	20	11..18..25
	fuelwood	20	20	11..18..25
	chips and particles	96	86	5..25..63
	wood residues	67	86	5..25..63
	bark	67	86	5..25..63
	wood charcoal	-	-	-
	wood pellets	93	86	8..9..11
	wood briquettes	93	86	12..12..14
tertiary sources		90	86	24
wood from unknown sources		42	30	5..18..63

Source: UN 1987, Simpson 1998, Alakangas 2005, Alakangas and Virkkunen 2007, Hartmann 2009, UNECE/FAO 2010, EN 14961-5:2011, Weimar et al. 2012, ISO 17225-2:2014, ISO 17225-3:2014, ISO 17225-4:2014, TFZ 2014, Krajnc 2015, DEPI 2016, Bioenergy Europe 2018, Glasenapp and McCusker 2018, UNSD 2018, FAOSTAT 2019a, FAOSTAT 2019b, FAOSTAT 2019c, Mantau 2019

Wood energy from primary sources includes wood fiber for energy conversion from forests and non-forestland that have not been processed for other purposes than combustion (Glasenapp and McCusker 2018). The share of coniferous wood was estimated through wood fuel removals from the forest in 2014-2018 period. Coniferous wood represented 42% and 30% of wood fuel removals in Germany and EU28 respectively (FAOSTAT 2019c). European standard sets moisture content for split log consumption in the residential sector at < 25% (EN 14961-5:2011), which includes the 18% moisture content estimated by Simpson (1998) for a German winter period. Others reported moisture contents ranging from 11 to 25% (UN 1987, Alakangas and Virkkunen 2007, Hartmann 2009, Krajnc 2015). For subsequent calculations, we use a moisture content of 18% for EU28 member states.

Wood from non-forestlands includes wood from e.g., gardens and agricultural areas (Glasenapp and McCusker 2018). Because coniferous wood species are less prevalent in these areas, we presume lower coniferous wood shares (20%) in wood from non-forestlands. Moisture content is presumed to match figures for wood sourced from forests.

Wood energy from secondary sources comprises co-products of the wood processing industries, which includes unprocessed solid (e.g., chips, shavings and bark) and liquid (e.g., black liquor) co-products as well as processed wood-based fuels (e.g., pellets and briquettes) (Glasenapp and McCusker 2018). The residential sector consumes solid co-products only and liquid co-products were excluded from our analysis (JWEE 2019, UNSD 2019b). The majority of unprocessed co-products in Germany are coniferous, due to the fact that wood processing industries use more volumes of coniferous than non-coniferous raw materials (Mantau 2019). For member states of EU28 we used average removals of sawlogs and veneer logs in 2014-2018 period to estimate coniferous and non-coniferous wood compositions in wood residues and chips and particles (FAOSTAT 2019b). Average moisture content for seasoned solid co-products was reported at 5 to 63% (Alakangas 2005,

²⁸NC wood composition can be derived through: $NC = 100 - C$.

ISO 17225-4:2014, TFZ 2014, Weimar et al. 2012, Krajnc 2015). However, unprocessed co-products can show even wetter moisture content. We presume that average moisture content of co-products used in the residential sector equals 25% (UN 1987, Alakangas and Virkkunen 2007, Hartmann 2009, EN 14961-5:2011, Weimar et al. 2012, Coffin 2014, TFZ 2014). For loose bark we applied the same property assumptions as for wood residues, given that bark shows similar characteristics to the wood it is attached to (UNECE/FAO 2010).

Solid processed wood-based fuels comprise wood pellets and briquettes as well as wood charcoal. Pellet and briquette producers source raw materials from wood processing industries, thus the high share of coniferous wood in this fuel type (Bioenergy Europe 2018, Mantau 2019). In Germany, coniferous wood fibre accounted for about 93..98% of fiber input used for wood pellets and briquettes (Bioenergy Europe 2018, Mantau 2019). Data on sawlogs and veneer logs removals show that 91% denotes from coniferous wood (FAOSTAT 2019b). We follow empirical findings reported by Mantau (2019) and presume that wood pellets and briquettes contain 93% coniferous wood. Bioenergy Europe (2018) reports that this figure is 86% coniferous for European pellet production, which corresponds to coniferous and non-coniferous wood distribution of sawlogs and veneer logs removals (FAOSTAT 2019b). Average moisture content for wood pellets is reported at 8 to 11% (Alakangas and Virkkunen 2007, Weimar et al. 2012, ISO 17225-2:2014, Krajnc 2015), while wood briquettes can be wetter at 12 to 14% (ISO 17225-3:2014, DEPI 2016). International energy statistics separate biofuels (primary products) from wood charcoal (secondary products). The heating value for wood charcoal is reported at 14.9..29.5..58.0 MJ/kg and will be used as a default conversion factor (UNSD 2018).

Tertiary sources are comprised of wood waste, which were originally used for material purposes like construction, packaging or furniture (Glasesnapp and McCusker 2018). The preponderance of coniferous wood in reclaimed materials is explained by the large demand of coniferous wood in construction, packaging and furniture sectors (FAOSTAT 2019a). The average moisture content for wood from tertiary sources was reported at 24% in Germany and equally adopted to member states of EU28 (Weimar et al. 2012). We presume that wood species distribution and moisture content of wood from unknown sources matches the ones of wood from forests.

Table 1 and Table 2 provide information to construct factors for conversion of volume solid wood²⁹ into net caloric value. We conducted conversion in two steps. First, we converted volume to weight using basic density at wet state; second, we used lower heating value at respective moisture content for weight to energy conversion. Equation 1 shows the relationship of oven dry density and density at wet state, used for volume to weight conversion (Niemz and Sonderegger 2017).

$$\rho_{(u)} = \rho_0 * \frac{1+u}{1+\beta_v * \min(u, 0.3)} \quad (1)$$

Equation 2 shows how to adjust $H_{i,(u)}$ by the influence of moisture content,

$$H_{i,(u)} = H_{i,(u=0)} * \left(1 - \frac{u}{1+u}\right) - H_{H_2O} * \frac{u}{1+u}, \quad (2)$$

²⁹ Solid wood refers to a volume of wood exclusive of void spaces (UNECE/FAO 2010).

where $H_{i,(u=0)}$ denotes lower heating value at $u = 0\%$ and H_{H_2O} the enthalpy of water at 25 °C (2.441 MJ/kg) (Kollmann 1951, Hartmann 2009). Equation 2 facilitates weight to energy conversion. Multiplication of Equation 1 and Equation 2 provides a factor ($CF_{(u)}$) for conversion of volume solid wood into energy net caloric value at given u (Equation 3),

$$CF_{(u)} = \rho_{(u)} * H_{i,(u)}. \quad (3)$$

Results

Table 3 shows conversion factors by forest products for Germany. We computed factors for weight to energy ($H_{i,(u)}$) and volume to energy ($CF_{(u)}$) conversion. Factors were obtained using equation 1, 2 and 3 as well as standard values presented in Table 1 and Table 2. In Germany, $H_{i,(u)}$ varied from 14.36 to 17.05 MJ/kg (excluding wood charcoal). Highest values were recorded for wood pellets and briquettes. $CF_{(u)}$ ranged from 7,638 to 10,252 MJ/m³. Factors for wood from non-forest land denoted highest values.

Table 3: Conversion factors relative to weight and volume, by forest products in Germany.

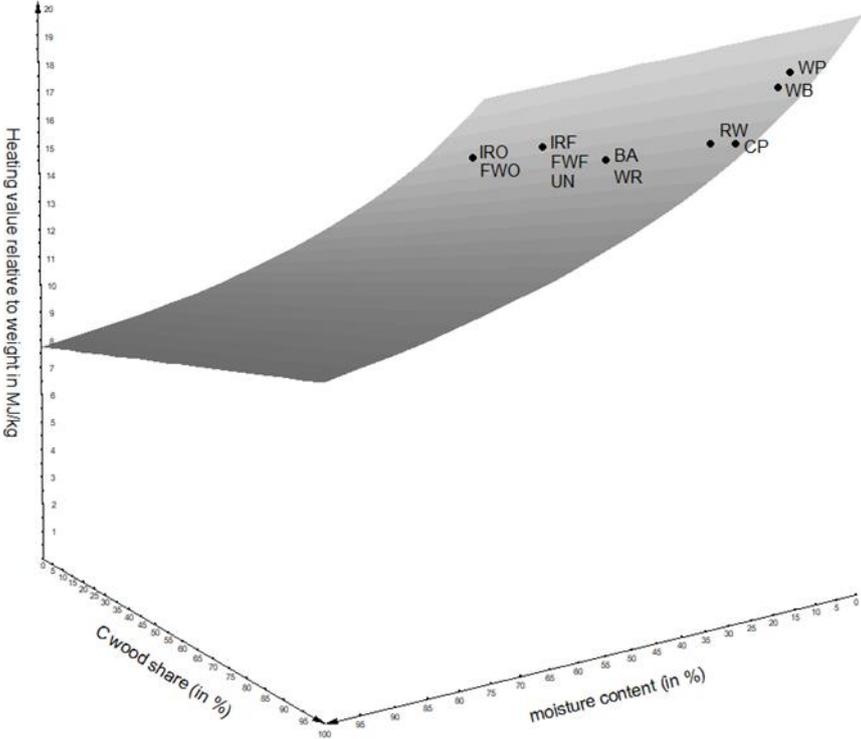
category		forest product	Germany	
			$H_{i,(u)}$	$CF_{(u)}$
primary source	forests	industrial roundwood	15.16	9,594
		fuelwood	15.16	9,594
	non-forestlands	industrial roundwood	14.99	10,252
		fuelwood	14.99	10,252
secondary source		chips and particles	14.57	7,638
		wood residues	14.36	8,498
		bark	14.36	8,498
		wood charcoal ³⁰	29.5	-
		wood pellets	17.05	8,397
		wood briquettes	16.52	8,265
tertiary sources			14.67	7,859
wood from unknown sources			15.16	9,594

Factors vary conditional on forest products' properties. Figure 1 shows how flexible wood species composition and moisture content affect conversion factor results. Dots inside the planes indicate factors shown in Table 3. IRF and FWF denote industrial roundwood and fuelwood sourced from forests. IRO and FWO denote industrial roundwood and fuelwood sourced from non-forestland. Wood energy from secondary sources comprises unprocessed fuels: chips and particles (CP); wood residues (WR) and; bark (BA); as well as processed fuels: wood pellets (WP) and; wood briquettes (WB). Tertiary sources and wood from unknown sources are indicated with RW and UN respectively.

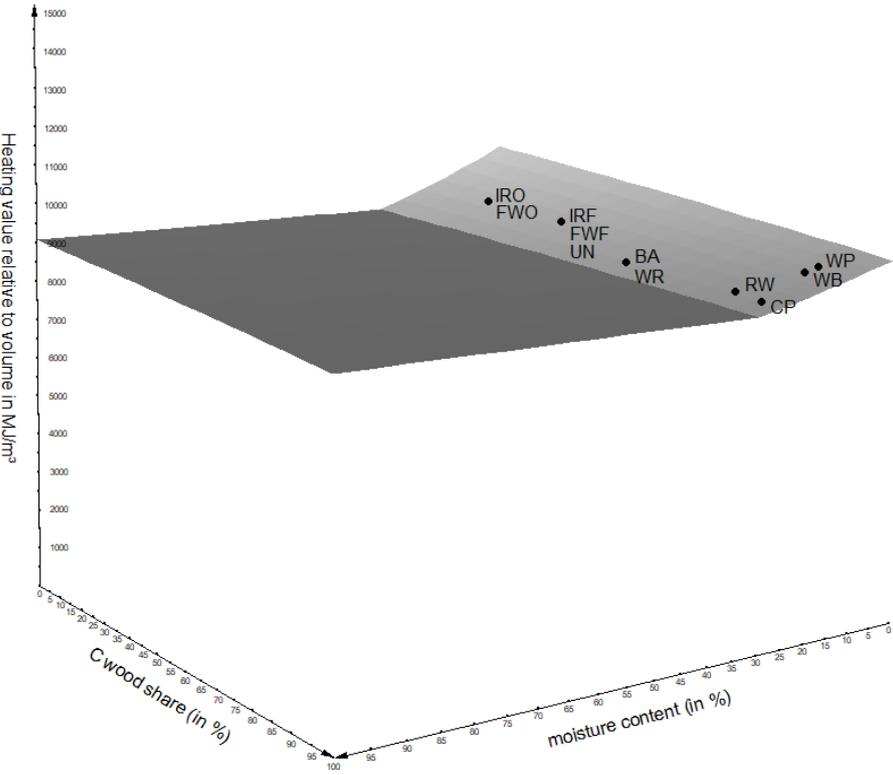
³⁰ Default conversion factor for energy statistics (UNSD 2018).

Figure 1: Lower heating value at flexible coniferous wood composition and moisture content in percent.

a) Lower heating value relative to weight ($H_{i,(u)}$) in MJ/kg.



b) Lower heating value relative to volume ($CF_{(u)}$) in MJ/m³.



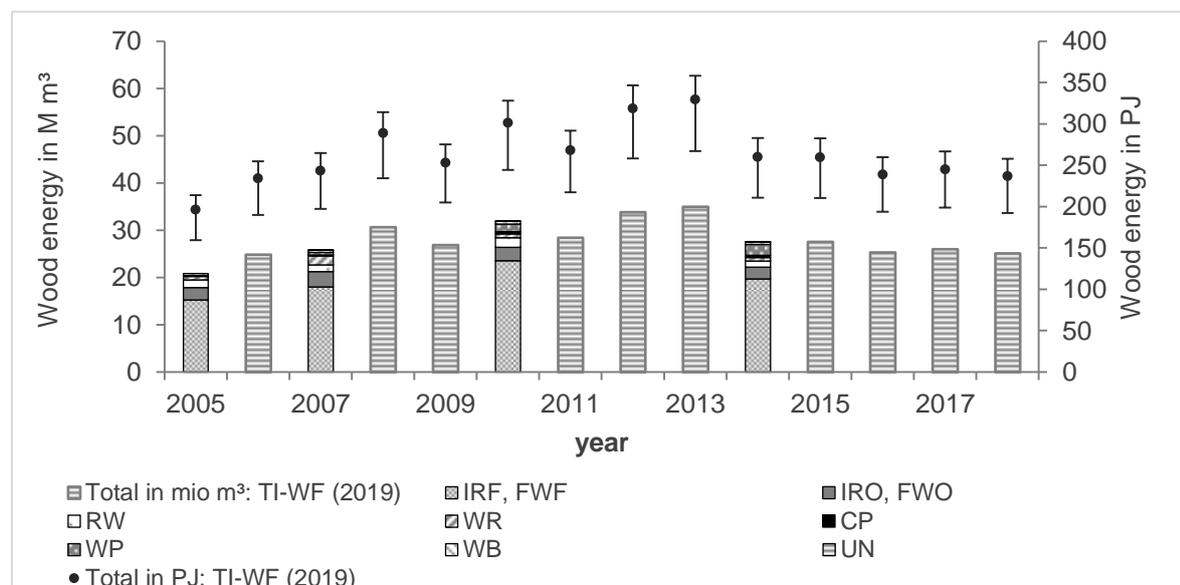
$H_{i,(u)}$ shows high values when moisture content is low and decreases in a non-linear fashion with incremental moisture content. Incremental coniferous wood shares increase $H_{i,(u)}$. However, effects seem to be minor. $CF_{(u)}$ decreases at incremental moisture content when $u \leq 30\%$. At $u > 30\%$, changes in moisture content marginally affect $CF_{(u)}$. Increasing shares of coniferous wood decrease $CF_{(u)}$. However, changes in wood species composition generally show minor effects on $CF_{(u)}$.

Conversion factors facilitate transformation of German forest products statistics into energy units suitable for energy statistics. Figure 2 shows residential wood energy use by forest products in volume (m^3 solid wood equivalents) in 2005, 2007, 2010 and 2014 (Mantau and Sörgel 2006, Hick and Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016). Based on the empirical data, TI-WF (2019) estimated longitudinal data for total residential wood energy consumption.

Conversion of residential wood energy consumption data into energy units (PJ) requires application of $CF_{(u)}$ to corresponding forest products (Table 3). $CF_{(u)}$, weighted by forest product compositions for 2005, 2007, 2010 and 2014, was $9,420 \pm 36$ MJ/ m^3 , at a 5 % significance level. Variation is due to annual changes in forest product compositions. $CF_{(u)}$ for chips and particles denoted minimum ($7,638$ MJ/ m^3) and $CF_{(u)}$ for wood from non-forestland denoted maximum ($10,252$ MJ/ m^3) values for conversion.

Conversion results suggest that wood energy use in German households was lowest at 196 PJ in 2005 and increased to 329 PJ in 2013. Since 2013, residential wood energy consumption decreased to 237 PJ in 2018. Conversion results vary by 54-91 PJ when extreme $CF_{(u)}$ ratios are applied instead of the weighted average of $CF_{(u)}$.

Figure 2: Residential wood energy consumption by forest products (excl. wood charcoal).



Source: Mantau and Sörgel 2006, Hick and Mantau 2008, Mantau 2012, Döring et al. 2016, TI-WF 2019

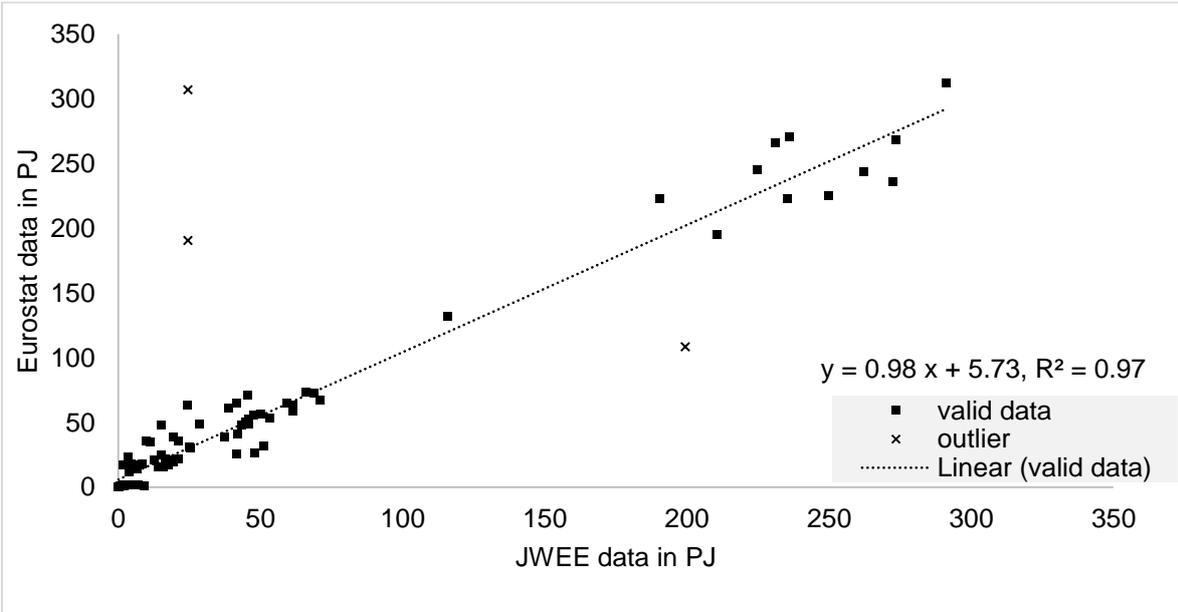
In Europe, most member states have national information on forest product types used in the residential sector. The UNECE/FAO JWEE gathers this information to improve forest products statistics (Glaser and McCusker 2018). Similar to the German example, we

computed conversion factors for each EU28 member state and applied factors to convert data from the JWEE into energy units (JWEE 2019). An Appendix B shows relevant conversion factors. Results suggest that conversion factors relative to weight range from 13.88 to 17.14 MJ/kg in EU28 member states (Appendix B.1). Factors for wood sourced from forest and non-forest land ranged from 14.73 to 15.53 MJ/kg. Wood from secondary and unprocessed sources denoted forest products with lowest energy content relative to weight (13.88 to 14.63 MJ/kg). Processed wood based fuels showed the largest energy to weight ratios (15.77 to 17.14 MJ/kg) compared to all other forest products. Factors for wood from tertiary sources ranged from 14.01 to 14.77 MJ/kg.

An Appendix B.2 provides factors for volume to energy conversion in EU28 member states. Factors range from 7,316 to 11,031 MJ/m³. Wood sourced from forest and non-forest land showed variation ranging from 8,376 to 10,748 MJ/m³. Wood from secondary and unprocessed sources showed lowest energy content relative to volume (7,316 to 10,068 MJ/m³). Factors for processed wood based fuels ranged from 7,811 to 11,031 MJ/m³ and factors for wood from tertiary sources from 7,352 to 10,124 MJ/m³. In many instances, variation of factors relative to volume was however greater between countries than between forest products.

Country specific factors relative to weight and information on moisture content (Table 2) were used for converting and comparing data from forest products and energy statistics. Figure 3 shows data from Eurostat (2019b), representing energy statistics, plotted against corresponding and converted data from JWEE (2019) for 2007, 2009, 2011, 2013 and 2015, which represents forest products statistics. Data points for Italy (2009 and 2011) and Poland (2015) were considered as outliers and excluded from our analysis. A line of best fit at n=79 indicates a slope of 0.98 ± 0.04^{31} and an intercept of 5.73 ± 3.77^{31} at an $R^2=97\%$.

Figure 3: Residential wood energy consumption (excl. wood charcoal) in EU28 member states.



Source: Eurostat 2019b, JWEE 2019

³¹ At 95% confidence level.

Discussion

Results for conversion factors relative to weight (13.88 to 17.14 MJ/kg) for the residential sector in EU28 resemble the 12.2 to 17.2 MJ/kg reported by Krajnc (2015) and factors recommended for energy statistics (7.9..15.6..31.0 MJ/kg) for all sectors. The extreme value at 31.0 MJ/kg seem to be erroneous however (UNSD 2018). Equation 2 implies that maximum conversion factors can't exceed highest values for lower heating value of dry wood (19.0 MJ/kg for fir, Appendix A). For wood pellets, heating values relative to weight were reported at 17.3 MJ/kg (UNSD 2018). In addition, Hartmann (2009) and Krajnc (2015) reported factors at 17.1 MJ/kg and 17.0 MJ/kg. Our estimates for EU28 member states resemble what has been found by others for wood pellets (16.27 to 17.14 MJ/kg).

Variation in conversion factors relative to weight results from assumptions over lower heating value at dry state ($H_{i,(u=0)}$) and moisture content (Equation 2). Coniferous wood shows higher values for $H_{i,(u=0)}$ compared to non-coniferous wood, which explains incremental conversion factors at higher coniferous wood shares. The example for Germany suggests however, that effects of changes in wood species composition are small. Changes in moisture content show much stronger effects on weight to energy conversion (Figure 1; Hartmann 2009). Thus, different assumptions on moisture content presumably explain most of the variation in factors relative to weight.

Common use of volumetric measures for forest products (UNECE/FAO 2010), call for factors enabling volume to energy conversion. Recommendation for energy statistics doesn't provide such factors (UNSD 2018). However, factors can be obtained through multiplication of energy to weight ratio and basic density at given moisture content (Equation 3). Conversion factors relative to volume show different order of magnitude compared to factors relative to weight, because density varies between considered forest products. In addition, factors change conditional on changes in moisture content when moisture content is below saturation point. Volume change drives changes in conversion factors in this range of moisture content (Figure 1; Hartmann 2009). The residential sector uses forest products at a moisture content below saturation point (EN 14961-5:2011, ISO 17225-2:2014, ISO 17225-3:2014, ISO 17225-4:2014), which confirms importance of accounting for volume change at volume to energy conversion. Variation in conversion factors can have significant effects on conversion results. For instance, application of lowest and highest conversion factors relative to volume on German residential wood energy use, result in -19% and +9% wood energy use as compared to results obtained with a weighted conversion factor (Figure 2).

Impact of variation in conversion factors underline importance of information on forest products used for energy conversion for obtaining unbiased conversion results. On national level, information on residential wood energy use by forest products is available in most EU28 member states. On international level, forest products statistics do provide disaggregated forest product data without distinguishing consuming sectors. Energy statistics collect detailed information on consuming sectors but lack disaggregated information on forest products used for energy conversion. The Joint Wood Energy Enquiry (JWEE) denotes the sole reporting scheme that gathers detailed information on forest products and energy consumers in EU28 region. However, information is collected on a biannual and voluntary basis which results in an inconsistent dataset (Glasenapp and McCusker 2018). Comparison of existing data on total consumption in the residential sector, obtained from JWEE (2019)

and Eurostat (2019b), results in a line of best fit with a slope not significantly different from 1 at a significance level of 5%. The intercept was significantly different from zero (5.73 ± 3.77 PJ), suggesting that data from JWEE is slightly underestimating residential wood energy use compared to Eurostat (2019b). In addition, an $R^2=97\%$ point at inconsistencies between both datasets.

Differences might derive from the use of different data sources in forest products and energy statistics respectively or application of different conversion factors. Lack of collaboration between entities responsible for forest products and energy statistics at national level can explain the use of different data sources for wood energy reporting. UNECE/FAO conducted several capacity building workshops to improve this situation (Glaserapp and McCusker 2018).

Data processing can also influence results. For instance, empirical data on residential wood energy consumption is usually gathered in physical units e.g., weight and volume (Whiteman 2017). These units have to be converted to energy units to suit the structure of an energy balance. Effects of conversion factors have been proven significant for Germany and thus, can explain inconsistencies between data from JWEE (2019) and Eurostat (2019b). Universal conversion factors at national level would improve data comparability.

We provided the framework to compute universal conversion factors. However, we acknowledge that further research is required to refine national conversion factors and enable the use of universal factors in the EU28 region. For instance, information on average moisture content denotes estimates, which mainly base on EU standards (EN 14961-5:2011, ISO 17225-2:2014, ISO 17225-3:2014, ISO 17225-4:2014). Standards provide good estimates for processed wood-based fuels (e.g., wood pellets) but might be imprecise for wood from primary and secondary sources. We suggest including information on moisture content in relevant reporting schemes (e.g., the JWEE) which would allow computation of accurate conversion factors at national level.

A complete picture on wood energy use also requires recognition of wood energy use in the non-residential sector, which has received little attention in international wood energy reporting so far (Whiteman 2017). Conversion factors used for the residential sector can also be applied to the non-residential sector. However, the non-residential sector consumes liquid co-products (e.g., black liquor) which are not relevant to the residential sector. Conversion factors for black liquor have been provided already (5.9..11.8..23.0 GJ/t), but variation appears to be high which calls for more research in this field (UNSD 2018). In addition, moisture content of forest products (e.g., chips and particles) might be higher in the non-residential sector due to different combustion technologies. Different assumptions over moisture content would either require conversion factors for respective combustion technologies or introduction of forest products that provide information on moisture content. For example, chips and particles could be separated into different classes of moisture content to distinguish the use of e.g., seasoned chips and particles in the residential sector from consumption of wetter chips and particles in energy plants (Weimar et al. 2012, Coffin 2014).

A better integration of forest products and energy statistics will have positive effects on data quality and policy making. Integration can initiate a validation process of national wood energy data, which improves forest products as well as energy statistics (Glaserapp and McCusker 2018). In addition, once data coherence is established,

combination of forest products and energy statistics can provide annual estimates for wood energy use disaggregated by forest products. Information is relevant for future energy reporting in EU28 member states (EU 2018). Moreover, information on wood energy sourced from forests is also relevant for tracing progress towards achieving SDG 15.2 (SDG 2019a) and understanding e.g., competition for wood resources (Glaser and McCusker 2018). Examples show that disaggregated wood energy data becomes increasingly relevant in sustainable policy making.

Conclusion

The residential sector uses wood from primary, secondary and tertiary sources for energy conversion. Most energy statistics provide aggregated data of woody and non-woody biomass consumption by sectors. Forest product statistics lack information on wood energy consuming sectors. Distinction of forest products is very detailed however. The UNECE/FAO Joint Wood Energy Enquiry (JWEE) was developed to improve this situation and provides information on the use of forest products for energy conversion by sectors. However, data from JWEE show inconsistencies.

Integration of forest products and energy statistics requires the use of coherent datasets and conversion factors. Forest products statistics commonly use weight and volume as a measure of quantities which can be converted to energy units using basic density, moisture content, volume change and lower heating value. Factors relative to weight range from 13.88 to 17.14 MJ/kg. Changes in moisture content show significant effects on the factors. Factors relative to volume range from 7,316 to 11,031 MJ/m³ and exhibit significant changes in response to changes in moisture content when moisture content is below saturation point (Figure 1). Variation in factors showed strong effects on conversion results for wood energy use in the German residential sector which underlines importance of accounting for individual forest products.

Conversion of data from JWEE (2019) and comparison with Eurostat (2019b) revealed minor inconsistencies between forest products and energy statistics, potentially due to a lack of collaboration of responsible entities at national level. The use of universal conversion factors may improve data coherence. However, for the production of universal conversion factors, more information is required on national forest products' properties, thus our suggestion to include this information in relevant reporting schemes (e.g., the JWEE). Respective reporting schemes should also consider including subcategories for forest products to account for variation in moisture content conditional on combustion technology. Although some of the conversion factors for the residential sector can be used for the non-residential sector, forest products' moisture content might exhibit different magnitude due to different combustion technologies which requires additional information to compute accurate conversion factors for the non-residential sector.

Declaration of interest

None.

Publication bibliography

Alakangas, E. (2005): Properties of wood fuels used in Finland. Biosouth project, PRO2/P2030/05. Technical research center of Finland, VTT Processes.

Alakangas, E.; Virkkunen, M. (2007): Biomass fuel supply chains for solid biofuels. From small to large scale. EUBioNet 2, Intelligent Energy Europe.

Bioenergy Europe (2018): Statistical Report 2018. Full report. Available online at <http://achbiom.cl/wp-content/uploads/2019/02/STATISTICAL-REPORT-2018.pdf>, checked on 11/14/2019.

BMWi (2018): Erneuerbare Energien in Zahlen. Nationale und Internationale Entwicklung im Jahr 2017. Bundesministerium für Wirtschaft und Energie.

Coffin, G. (2014): Use of by-product wood chips and other biomass in a combined heat and power system at the University of Missouri Power Plant. In F. X. Aguilar (Ed.): Wood Energy in Developed Economies. Resource Management, Economics and Policy: Routledge, pp. 253–278.

DEPI (2016): Heizen mit Holzbriketts. Produktion Handel Verbrennung. Deutsches Pelletinstitut GmbH.

Döring, P.; Glasenapp, S.; Mantau, U. (2016): Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2014. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Hamburg.

EN 14961-5:2011, 2011: Solid biofuels - Fuel specifications and classes. Firewood for non-industrial use.

EU (2018): Regulation (EU) 2018/1999 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the Governance of the Energy Union and Climate Action, amending Regulations (EC) No 663/2009 and (EC) No 715/2009 of the European Parliament and of the Council, Directives 94/22/EC, 98/70/EC, 2009/31/EC, 2009/73/EC, 2010/31/EU, 2012/27/EU and 2013/30/EU of the European Parliament and of the Council, Council Directives 2009/119/EC and (EU) 2015/652 and repealing Regulation (EU) No 525/2013 of the European Parliament and of the Council, PE/55/2018/REV/1. Official Journal of the European Union, L 328, p. 1-77.

Eurostat (2019a): Production of electricity and derived heat by type of fuel. [nrg_bal_peh]. Available online at <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do>, checked on 11/5/2019.

Eurostat (2019b): Supply, transformation and consumption of renewable energies. annual data [nrg_107a]. Available online at <https://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do>, checked on 11/5/2019.

FAO (2015): Global Forest Resource Assessments. Country reports 2015. Available online at <http://www.fao.org/forest-resources-assessment/current-assessment/country-reports/en/>, checked on 10/20/2019.

FAO (2017): Yearbook of Forest Products 2015. Available online at <http://www.fao.org/3/a-i7304m.pdf>, checked on 12/11/2019.

FAO (2019): Forest products statistics. FAO Yearbook of Forest Products. Available online at <http://www.fao.org/forestry/statistics/80570/en/>, checked on 11/13/2019.

FAOSTAT (2019a): Forestry Production and Trade, Production Quantity, Industrial round-wood coniferous/non-coniferous. Available online at <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>, checked on 11/14/2019.

FAOSTAT (2019b): Forestry Production and Trade, Production Quantity, Sawlogs and veneer logs coniferous/non-coniferous. Available online at <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>, checked on 11/14/2019.

FAOSTAT (2019c): Forestry Production and Trade, Production Quantity, Woodfuel coniferous/non-coniferous. Available online at <http://www.fao.org/faostat/en/#data/FO>, checked on 11/14/2019.

Glaserapp, S.; McCusker, A. (2018): Chapter 2: Wood energy data: the joint wood energy enquiry. In F. X. Aguilar (Ed.): Wood Energy in the ECE region. Data trends and outlook in Europe the Commonwealth of Independent States and North America (ECE/TIM/SP/42), pp. 12–29.

Hagauer, D.; Lang, B.; Nemestothy, K. P. (2008): Instruction Manual for the Calculation of Wood Fuel Parameters. Version 1.6-ENG. klima:aktiv energieholz, Österreichische Energieagentur - Austrian Energy Agency. Available online at <https://www.klimaaktiv.at/service/tools/erneuerbare/kenndatenkalkulation.html>, checked on 11/13/2019.

Hartmann, H. (2009): Grundlagen der thermo-chemischen Umwandlung biogener Festbrennstoffe. In M. Kaltschmitt, H. Hartmann, H. Hofbauer (Eds.): Energie aus Biomasse. Grundlagen, Techniken und Verfahren. 2nd ed.: Springer, pp. 333–461.

Hick, A.; Mantau, U. (2008): Energieholzverwendung in privaten Haushalten. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Hamburg.

IEA (2009): Renewable energy questionnaire. Available online at <https://www.iea.org/media/statistics/questionnaires/RenQues.xlsm>, checked on 9/11/2019.

ISO 17225-2:2014, 2014: Solid biofuels - Fuel specifications and classes. Graded wood pellets.

ISO 17225-3:2014, 2014: Solid biofuels - Fuel specifications and classes. Graded wood briquettes.

ISO 17225-4:2014, 2014: Solid biofuels - Fuel specifications and classes. Graded wood chips.

JWEE (2019): Joint Wood Energy Enquiry. data flat file. Available online at <https://www.unece.org/forests/jwee.html>, checked on 11/13/2019.

Kollmann, F. (1951): Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe. 1st edition. Edited by Springer Verlag.

Krajnc, N. (2015): Wood Fuels Handbook. ISBN 978-92-5-108728-2. FAO.

Lohmann, U. (1998): Holz Handbuch. ed. 5. Edited by DRW-Verlag.

Mantau, U. (2012): Energieholzverwendung in privaten Haushalten 2010. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Hamburg.

Mantau, U. (2019): Holzrohstoffbilanz Deutschland. Entwicklung des Holzaufkommens und der Holzverwendung 1987 bis 2016. Informationssysteme für Rohstoffe.

Mantau, U.; Saal, U.; Prins, K.; Steierer, F.; Lindner, M.; Verkerk, H. et al. (Eds.) (2010): EU-wood - Real potential for changes in growth and use of EU forests. Final report.

Mantau, U.; Sörgel, C. (2006): Energieholzverwendung in privaten Haushalten. Marktvolumen und verwendete Holzsortimente. Hamburg.

Niemz, P.; Sonderegger, W. (2017): Holzphysik. Physik des Holzes und der Holzwerkstoffe. Edited by Fachbuchverlag Leipzig im Carl Hanser Verlag.

Scarlat, N.; Dallemand, J.-F.; Monforti-Ferrario, F.; Banja, M.; Motola, V. (2015): Renewable energy policy framework and bioenergy contribution in the European Union – An overview from National Renewable Energy Action Plans and Progress Reports. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (51), pp. 969–985. DOI: 10.1016/j.rser.2015.06.062.

SDG (2019a): Sustainable Development Goal 15. Available online at <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg15>, checked on 11/8/2019, 10.25.

SDG (2019b): Sustainable Development Goal 7. Ensure access to affordable, reliable, sustainable and modern energy for all. Available online at <https://sustainabledevelopment.un.org/sdg7>, checked on 11/13/2019.

Sell, J. (1997): Eigenschaften und Kenngrößen von Holzarten. 4th edition. Edited by Bau-fachverlag Lignum.

Simpson, W. T. (1998): Equilibrium Moisture Content of Wood in Outdoor Locations in the United States and Worldwide. Research Note FPL-RN-0268. United States Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.

TFZ (2014): Qualitätshackschnitzel nach DIN EN ISO 17225-4. TFZ-Merkblatt: 14BKU002. Available online at http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/14bku002_mb_brennstoffspezifikation_von_qualitaetshackschnitzel.pdf, checked on 10/31/2019.

TFZ (2019): Feste Regenerative Energieträger Datenbank (FRED). Technologie- und Förderzentrum, Bayrisches Landesamt für Umwelt. Available online at <https://www.fred.bayern.de/>, checked on 12/6/2019.

TI-WF (2019): Holzeinschlag und Rohholzverwendung. Thünen-Institut für Internationale Waldwirtschaft und Forstökonomie. Hamburg. Available online at www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/produktion-und-verwendung/holzeinschlag-und-rohholzverwendung/, checked on 9/12/2019.

UN (1987): Energy Statistics. Definitions, units of measure and conversion factors. ST/ESA/STAT/SER.F/44. United Nations.

UNECE/FAO (2010): Forest product conversion factors for the UNECE region. Geneva forest and timber discussion paper 49. ECE/TIM/DP/49. UNECE/FAO.

UNSD (2018): International Recommendation for Energy Statistics (IRES). ST/ESA/STAT/SER.M/93. United Nations.

UNSD (2019a): Annual Questionnaire on Energy Statistics. Available online at <https://unstats.un.org/unsd/energystats/questionnaire>, checked on 10/29/2019.

UNSD (2019b): Energy Statistics Database. Available online at <http://data.un.org/Explorer.aspx>, checked on 10/29/2019.

Wagenführ, R. (2004): Bildlexikon Holz. ISBN 3-446-22851-9. ed. 2. Edited by Carl Hanser Verlag Fachbuchverlag.

Wagenführ, R. (2007): Holzatlas. ISBN-10: 3-446-40649-2, ISBN-13: 978-3-446-40649-0. ed. 6. Edited by Carl Hanser Verlag Fachbuchverlag. Leipzig.

Weimar, H.; Döring, P.; Mantau, U. (2012): Standorte der Holzwirtschaft – Holzrohstoffmonitoring. Einsatz von Holz in Biomasse-Großfeuerungsanlagen 2011. Abschlussbericht. Universität Hamburg, Zentrum Holzwirtschaft, Arbeitsbereich Ökonomie der Holz- und Forstwirtschaft. Hamburg.

Whiteman, A. (2017): Bioenergy. The Achilles heel of renewable energy statistics. Energy Statistics Newsletter, No. 17. United Nation Statistics Division.

Zimmermann, G. (1982): Zahlen Lexikon Holz. ISBN 3-87181-308-7. Edited by DRW-Verlag Stuttgart.

Appendix:

Appendix A: Wood properties and Growing stock composition by species.

species name	oven dry density, ρ_0			lower heating value, $H_{i,(u=0)}$	differential volume swelling, β_v			growing stock in %	
	standard	min	max		standard	min	max	Germany	EU28
coniferous									
Abies	406	320	710	19.0	0.36	0.34	0.38	4.1	5.0
Larix	536	400	820	18.2	0.44	0.38	0.50	4.5	2.7
Picea	428	300	640	18.9	0.40	0.39	0.40	53.8	44.2
Pinus	485	300	860	18.9	0.40	0.37	0.47	34.3	46.7
Pseudotsuga	478	320	730	18.6	0.40	0.38	0.42	3.3	1.4
non-coniferous									
Acer	590	480	750	17.3	0.34	0.38	0.39	0	0.8
Alnus	507	450	600	17.3	0.37	0.15	0.48	0	4.4
Betula	618	460	800	18.4	0.39	0.46	0.48	0	15.0
Carpinus	780	500	822	16.9	0.62	-	-	0	3.2
Castanea	571	470	612	^{a)} 17.7	0.38	0.38	0.39	0	3.3
Eucalyptus	734	660	790	^{a)} 17.7	1.09	-	-	0	1.7
Fagus	681	490	880	17.9	0.58	0.46	0.70	63.8	33.9
Fraxinus	654	410	820	17.8	0.44	0.43	0.46	0	1.6
Ostrya	^{b)} 780	^{b)} 500	^{b)} 822	^{b)} 16.9	^{b)} 0.62	-	-	0	0.5
Populus	423	360	560	18.1	0.42	0.36	0.48	0	3.4
Prunus	597	486	670	^{a)} 17.7	0.45	0.38	0.48	0	0.0
Quercus	673	390	930	18.0	0.46	0.26	0.68	36.2	30.4
Robinia	729	537	870	17.3	0.40	0.38	0.41	0	0.9
Salix	352	265	520	18.0	0.32	0.26	0.38	0	0.3
Sorbus	725	647	788	^{a)} 17.7	0.61	0.48	0.77	0	0.1
Tilia	492	320	564	^{a)} 17.7	0.49	0.48	0.50	0	0.5

Comment: a) Estimated through the mean of existing data.; b) Estimated through oven dry density for Carpinus.

Sources: Zimmermann 1982, Sell 1997, Lohmann 1998, Wagenführ 2004, Wagenführ 2007, Hartmann 2009, FAO 2015, TFZ 2019

Appendix B.1: Energy content by weight ($H_{i,(u)}$) in MJ/kg.

Country	IRF	FWF	IRO	FWO	CP	WR	BA	WP	WB	RW	UN
Austria	15.24	15.24	14.90	14.90	14.56	14.56	14.56	17.06	16.54	14.70	15.24
Belgium	14.93	14.93	15.02	15.02	14.42	14.42	14.42	16.90	16.38	14.56	14.93
Bulgaria	15.00	15.00	14.95	14.95	14.44	14.44	14.44	16.92	16.40	14.58	15.00
Croatia	14.73	14.73	14.90	14.90	13.95	13.95	13.95	16.36	15.86	14.08	14.73
Cyprus	15.53	15.53	14.93	14.93	14.55	14.55	14.55	17.05	16.52	14.69	15.53
Czech Republic	15.33	15.33	14.96	14.96	14.57	14.57	14.57	17.06	16.54	14.70	15.33
Denmark	15.33	15.33	14.95	14.95	14.48	14.48	14.48	16.96	16.44	14.62	15.33
Estonia	15.17	15.17	15.05	15.05	14.50	14.50	14.50	16.99	16.46	14.64	15.17
Finland	15.37	15.37	15.23	15.23	14.62	14.62	14.62	17.12	16.60	14.75	15.37
France	14.85	14.85	14.94	14.94	14.39	14.39	14.39	16.86	16.34	14.52	14.85
Germany	15.16	15.16	14.99	14.99	14.57	14.36	14.36	17.05	16.52	14.67	15.16
Greece	14.83	14.83	14.93	14.93	14.30	14.30	14.30	16.76	16.24	14.43	14.83
Hungary	14.76	14.76	14.90	14.90	13.88	13.88	13.88	16.27	15.77	14.01	14.76
Ireland	15.34	15.34	15.02	15.02	14.60	14.60	14.60	17.10	16.58	14.74	15.34
Italy	14.82	14.82	14.89	14.89	14.24	14.24	14.24	16.69	16.18	14.38	14.82
Latvia	15.01	15.01	15.07	15.07	14.46	14.46	14.46	16.94	16.42	14.60	15.01
Lithuania	15.11	15.11	15.00	15.00	14.38	14.38	14.38	16.85	16.33	14.52	15.11
Luxembourg	15.17	15.17	14.96	14.96	14.37	14.37	14.37	16.83	16.32	14.50	15.17
Malta	14.94	14.94	14.93	14.93	14.33	14.33	14.33	16.80	16.28	14.47	14.94
Netherlands	15.04	15.04	15.06	15.06	14.38	14.38	14.38	16.85	16.34	14.52	15.04
Poland	15.22	15.22	14.97	14.97	14.49	14.49	14.49	16.98	16.46	14.63	15.22
Portugal	14.95	14.95	14.93	14.93	14.62	14.62	14.62	17.13	16.60	14.76	14.95
Romania	14.96	14.96	14.98	14.98	14.25	14.25	14.25	16.70	16.19	14.39	14.96
Slovak Republic	15.17	15.17	14.91	14.91	14.36	14.36	14.36	16.83	16.31	14.50	15.17
Slovenia	14.85	14.85	14.90	14.90	14.54	14.54	14.54	17.04	16.51	14.68	14.85
Spain	15.22	15.22	14.98	14.98	14.47	14.47	14.47	16.95	16.43	14.60	15.22
Sweden	15.36	15.36	15.19	15.19	14.63	14.63	14.63	17.14	16.62	14.77	15.36
United Kingdom	15.41	15.41	14.95	14.95	14.56	14.56	14.56	17.05	16.53	14.69	15.41
EU28	15.07	15.07	14.99	14.99	14.51	14.51	14.51	17.00	16.48	14.65	15.07

Appendix B.2: Energy content by volume ($CF_{(u)}$) in MJ/m³.

Country	IRF	FWF	IRO	FWO	CP	WR	BA	WP	WB	RW	UN
Austria	8,895	8,895	10,097	10,097	7,410	7,410	7,410	8,042	7,917	7,448	8,895
Belgium	10,259	10,259	9,921	9,921	8,125	8,125	8,125	8,847	8,704	8,167	10,259
Bulgaria	10,129	10,129	10,268	10,268	8,446	8,446	8,446	9,211	9,060	8,491	10,129
Croatia	10,748	10,748	10,166	10,166	9,672	9,672	9,672	10,654	10,458	9,729	10,748
Cyprus	8,691	8,691	10,280	10,280	8,298	8,298	8,298	9,042	8,895	8,342	8,691
Czech Republic	8,714	8,714	10,053	10,053	7,512	7,512	7,512	8,155	8,029	7,550	8,714
Denmark	8,645	8,645	10,050	10,050	7,757	7,757	7,757	8,434	8,301	7,796	8,645
Estonia	8,662	8,662	8,842	8,842	7,867	7,867	7,867	8,530	8,399	7,906	8,662
Finland	8,999	8,999	9,519	9,519	7,780	7,780	7,780	8,438	8,308	7,819	8,999
France	10,493	10,493	10,205	10,205	8,334	8,334	8,334	9,075	8,929	8,377	10,493
Germany	9,594	9,594	10,252	10,252	7,638	8,498	8,498	8,397	8,265	7,859	9,594
Greece	10,488	10,488	10,195	10,195	8,673	8,673	8,673	9,542	9,369	8,724	10,488
Hungary	10,676	10,676	10,341	10,341	10,068	10,068	10,068	11,031	10,840	10,124	10,676
Ireland	8,748	8,748	10,102	10,102	7,316	7,316	7,316	7,932	7,811	7,352	8,748
Italy	10,242	10,242	10,002	10,002	8,473	8,473	8,473	9,252	9,098	8,519	10,242
Latvia	9,002	9,002	8,915	8,915	8,050	8,050	8,050	8,730	8,596	8,090	9,002
Lithuania	8,724	8,724	8,863	8,863	8,089	8,089	8,089	8,774	8,639	8,129	8,724
Luxembourg	9,399	9,399	10,234	10,234	8,280	8,280	8,280	9,043	8,892	8,325	9,399
Malta	10,157	10,157	10,195	10,195	8,565	8,565	8,565	9,410	9,242	8,614	10,157
Netherlands	9,991	9,991	9,925	9,925	8,491	8,491	8,491	9,243	9,094	8,536	9,991
Poland	9,224	9,224	9,799	9,799	8,254	8,254	8,254	8,972	8,830	8,296	9,224
Portugal	10,215	10,215	10,269	10,269	8,101	8,101	8,101	8,803	8,665	8,142	10,215
Romania	10,074	10,074	10,004	10,004	8,649	8,649	8,649	9,490	9,323	8,699	10,074
Slovak Republic	9,312	9,312	10,230	10,230	8,267	8,267	8,267	9,033	8,881	8,312	9,312
Slovenia	10,257	10,257	10,098	10,098	7,572	7,572	7,572	8,231	8,101	7,611	10,257
Spain	9,644	9,644	10,341	10,341	8,570	8,570	8,570	9,388	9,225	8,618	9,644
Sweden	8,855	8,855	9,434	9,434	7,597	7,597	7,597	8,239	8,112	7,635	8,855
United Kingdom	8,376	8,376	10,017	10,017	7,532	7,532	7,532	8,174	8,047	7,570	8,376
EU28	9,705	9,705	9,965	9,965	7,953	7,953	7,953	8,647	8,510	7,994	9,705

Anhang C: Erklärungen zum Eigenanteil der Veröffentlichungen

Erklärung des Eigenanteils an folgendem Artikel:

Glasenapp S, Aguilar F X, Weimar H, Mantau U (2019) Assessment of residential wood energy consumption using German household-level data. Biomass Bioenergy 126:117-129, [DOI:10.1016/j.biombioe.2019.04.020](https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2019.04.020)

Der Hauptautor des Artikels "Assessment of residential wood energy consumption using German household-level data" ist Sebastian Glasenapp. Die Co-Autoren des Artikels sind Francisco Aguilar, Holger Weimar und Udo Mantau. Der Artikel wurde am 02.10.2018 bei „Biomass and Bioenergy“ eingereicht und nach dem Peer-Review Verfahren begutachtet. Am 29.04.2019 wurde der Artikel akzeptiert und am 18.05.2019 veröffentlicht.

Für den Artikel wurden Haushaltsstichproben zu den Jahren 2005, 2010 und 2014 analysiert. Udo Mantau leitete die Erfassung der Daten. Sebastian Glasenapp war an der Konzeption für die Erhebung zum Jahr 2014 beteiligt. Im Anschluss an die Datenerfassung bereitete Sebastian Glasenapp die Daten eigenständig für die Auswertung vor. Die Datenauswertung, inklusive Programmierung der Analysesoftware, führte Sebastian Glasenapp selbstständig durch. Francisco Aguilar war an der Auswertung durch Fachgespräche beteiligt. Das Manuskript wurde überwiegend von Sebastian Glasenapp mit Unterstützung von Francisco Aguilar und Holger Weimar geschrieben.

Bestätigung durch den Betreuer


Prof. Dr. Udo Mantau 3.12.19

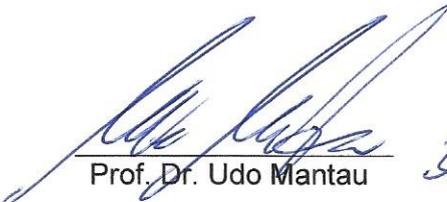
Erklärung des Eigenanteils an folgendem Artikel:

Mantau U, Mayr M L, Döring P, Saal U, Glasenapp S, Blanke C (2017) World markets for wood: status and prospects. In: Meyers R A (ed) Encyclopedia of sustainability science and technology. New York: Springer, pp 1-27, [DOI:10.1007/978-1-4939-2493-6_990-1](https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2493-6_990-1)

Der Hauptautor des Artikels "World markets for wood: status and prospects" ist Udo Mantau. Die Co-Autoren des Artikels sind Marian Mayr, Przemko Döring, Ulrike Saal, Sebastian Glasenapp und Christian Blanke. Der Artikel wurde am 12.07.2017 bei „Encyclopedia of Sustainability Science and Technology“ eingereicht und nach dem Peer-Review Verfahren begutachtet. Am 21.08.2017 wurde der Artikel akzeptiert und am 21.09.2017 veröffentlicht.

Die Datenbasis des Artikels wurden von Udo Mantau und Przemko Döring erstellt. Marian Mayr koordinierte die Zuarbeiten der übrigen Co-Autoren (Ulrike Saal, Sebastian Glasenapp und Christian Blanke), die jeweils einzelne Unterkapitel verfassten. Sebastian Glasenapp verfasste maßgeblich das Unterkapitel zur energetischen Holzverwendung.

Bestätigung durch den Betreuer


Prof. Dr. Udo Mantau 3.12.19

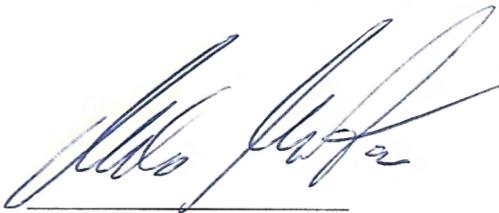
Erklärung des Eigenanteils an folgendem Manuskript:

Glaser S, Aguilar F, Döring P, Fonseca M, Weimar W, Conversion factors for residential wood energy consumption prelude harmonization of forest products and energy statistics. Renewable and Sustainable Energy Reviews.

Der Hauptautor des Artikels "Conversion factors for residential wood energy consumption prelude harmonization of forest products and energy statistics" ist Sebastian Glaser. Die Co-Autoren des Artikels sind Francisco Aguilar, Przemko Döring, Matthew Fonseca und Holger Weimar. Der Artikel wird bei „Renewable and Sustainable Energy Reviews“ eingereicht und nach dem Peer-Review Verfahren begutachtet.

Das methodische Konzept wurde für Deutschland in Zusammenarbeit verschiedener Personen, unter anderem mit Sebastian Glaser, entwickelt. Sebastian Glaser erweiterte das methodische Konzept für den europäischen Raum. Die Datenerfassung und Berechnung der Ergebnisse wurde von Sebastian Glaser durchgeführt. Das Manuskript wurde überwiegend von Sebastian Glaser mit Unterstützung von Francisco Aguilar, Przemko Döring, und Holger Weimar geschrieben.

Bestätigung durch den Betreuer



Prof. Dr. Udo Mantau

Erklärung des Eigenanteils an folgendem Artikel:

Glaserapp S, McCusker A (2018) Wood energy data: the joint wood energy enquiry. In: Aguilar, F X (ed) Wood energy in the ECE region : Data, trends and outlook in Europe, the Commonwealth of Independent States and North America. Geneva: UNECE, pp 12-29

Der Hauptautor des Artikels "Wood energy data: the joint wood energy enquiry" ist Sebastian Glaserapp. Alex McCusker ist Co-Autor des Artikels. Der Artikel wurde im Jahr 2018 von der Wirtschaftskommission für Europa der Vereinten Nationen (UNECE) veröffentlicht.

Für die Erstellung des Artikels führte Sebastian Glaserapp Analysen der Daten des Joint Wood Energy Enquiries¹ durch. Anschließend verfasste Sebastian Glaserapp die erste Fassung des Manuskripts. Alex McCusker übernahm sprachliche Korrekturen am Text und koordinierte die Überprüfung des Artikels durch z. B. Vertreter der UNECE, Internationalen Energieagentur (IEA), Internationalen Agentur für erneuerbare Energien (IRENA) und Eurostat.

Bestätigung durch den Betreuer


Prof. Dr. Udo Mantau 3.12.19

¹ <http://www.unece.org/forests/jwee.html> (Zugriff: 02.12.2019)

1 Deutsche Zusammenfassung

Haushalte setzen Holz aus primären, sekundären und tertiären Quellen für die energetische Verwendung ein. Informationen zum Brennholzeinsatz werden von Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft sowie des Energiesektors bereitgestellt. Beide Statistiken unterscheiden sich in der Struktur und dem Detailgrad der ausgewiesenen Informationen. Während die Statistik der Forst- und Holzwirtschaft Mengenströme von Holzsortimenten in Volumen- oder Gewichtseinheiten quantifiziert, wird die Holzverwendung in der Energiestatistik häufig als Aggregat, in Energieeinheiten angegeben. Um Informationen beider Statistiken vergleichen zu können, müssen die Einheiten umgerechnet werden. Aufgrund der detaillierten Informationen zu den Holzsortimenten bietet sich die Statistik der Forst- und Holzwirtschaft für eine genaue Berechnung des Energiegehalts in der Holzverwendung an.

Für die Berechnung von Umrechnungsfaktoren werden Informationen zu den Holzarteneigenschaften (z. B. Darrdichte, Quellverhalten und Heizwert) benötigt. Mit Hilfe der Holzartenverteilung im Holzvorrat wurde der Informationsgehalt reduziert und gewichtete durchschnittliche Holzeigenschaften für Laub- und Nadelholz berechnet. Auf Grundlage von Literaturangaben wurden außerdem Annahmen zu Nadelholzanteilen und Holzfeuchten von Sortimenten getroffen und anschließend länderspezifische Umrechnungsfaktoren berechnet.

Für Deutschland lagen die sortimentspezifischen Faktoren für den Heizwert im Verhältnis zum Gewicht zwischen 14,36 und 17,05 MJ/kg sowie bei 14,51 bis 17,00 MJ/kg für die EU28. Faktoren zur Umrechnung von Volumen- in Energieeinheiten nahmen für Deutschland Werte von 7.638 bis 10.252 MJ/m³ und für die EU28 Werte von 7.953 bis 9.965 MJ/m³ an. Den größten Einfluss auf die Ergebnisse hatte die Holzfeuchte. Insbesondere bei Faktoren in Relation zum Gewicht bewirkten Änderung über das gesamte Wertespektrum der Holzfeuchte deutliche Änderungen in den Umrechnungsfaktoren. Faktoren im Verhältnis zum Volumen zeigten, aufgrund der Schwind- und Quelleigenschaften von Holz, Änderungen bei Holzfeuchten von bis zu 30 %. Im Vergleich zu Angaben aus der Literatur wiesen die Ergebnisse gute Übereinstimmungen auf. Zusätzlich sind die berechneten Faktoren jedoch detaillierter und erlauben eine genauere Umrechnung von spezifischen Angaben aus der Statistik der Forst- und Holzwirtschaft. Die Berechnung der Umrechnungsfaktoren könnte verbessert werden, wenn z. B. empirische Daten zum Holzfeuchtegehalt einzelner Sortimente erhoben würden.

In Deutschland wurde der Brennholzeinsatz im Haushaltssektor in mehreren Erhebungen erfasst, die den Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft sowie des Energiesektors zuzuordnen sind. Die empirischen Studien weisen ähnliche Methoden bei der Datenerfassung und Hochrechnung auf. Im Allgemeinen wird der individuelle Brennholzeinsatz von Haushalten in Stichprobenbefragungen erfasst. Auf dieser Grundlage werden Verbrauchskennziffern bestimmt und der Brennholzeinsatz über Hochrechnungsgrößen für den deutschen Wohnungsbestand berechnet. Für Jahre in denen keine empirischen Erhebungsdaten vorliegen, werden Holzverbräuche durch statistische Modelle geschätzt. Die Arbeitsgruppe Erneuerbare Energien Statistik (AGEE-Stat) und Arbeitsgruppe Energiebilanzen (AGEB) verwenden die Ergebnisse der empirischen Studien, um offizielle Zeitreihen zum energetischen Holzeinsatz in Haushalten zu erstellen. Aufgrund von Unterschieden in den Datenquellen und Revisionen stimmen beide Zeitreihen nicht überein. Ab dem Berichtsjahr

2018 ist davon auszugehen, dass die Angaben beider Statistiken, durch die Verwendung derselben Datenbasis, übereinstimmen.

Im Zeitraum von 2000 bis 2010 gehen die Studien im Durchschnitt von einem Anstieg des energetischen Holzeinsatzes von 142 auf 284 PJ (15 auf 30 Mio. m³) aus. Ab dem Jahr 2010 ging der Holzeinsatz auf 236 PJ (25 Mio. m³) im Jahr 2017 zurück. Der Vergleich der Ergebnisse unterschiedlicher Studien verdeutlichte, dass sich Angaben zum Holzeinsatz teilweise stark unterscheiden. Unterschiede sind auf eine Vielzahl an Erfassungsschwierigkeiten zurückzuführen und können durch zufällige und systematische Fehler in der Erhebung sowie unterschiedliche Umrechnungsfaktoren und Modellannahmen erklärt werden. Ergebnisse zu den verwendeten Holzsortimenten legen nahe, dass Scheitholz aus dem Wald das wichtigste Holzsortiment für die Verwendung im Haushaltssektor war. Der Verbrauch von Scheitholz nahm in absoluten Zahlen tendenziell zu, während im selben Zeitraum die relativen Anteile zurückgingen. Die zunehmende Verwendung von Holzpellets begründet dabei den anteiligen Rückgang von Scheitholz. Die Bedeutung von Gebrauchtholz war für den Haushaltssektor aufgrund von gesetzlichen Bestimmungen gering.

Für den deutschen Holzmarkt hat die energetische Holzverwendung eine zunehmend wichtige Bedeutung. Seit dem Jahr 2009 weisen die energetischen Holzverwender ein ähnlich großes Nutzungsvolumen auf wie die stofflichen Verwender. Im Jahr 2016 verbrauchten Haushalte, nach der Sägeindustrie, das zweitgrößte Holzvolumen. Darüber hinaus setzten Haushalte, im Gegensatz zu anderen energetischen Holzverwendern, überwiegend Holz aus dem Wald ein. Für den Energiesektor spielt die energetische Holzverwendung eine untergeordnete Rolle. Importierte fossile Energieträger machen derzeit den größten Anteil am Energieaufkommen aus. Im Haushaltssektor waren Gas und Mineralöle die wichtigsten Energieträger für den Endenergieverbrauch. Obwohl die erneuerbaren

Energien einen relativ geringen Anteil am Energieverbrauch hatten, war der Zuwachs in den vergangenen Jahren im Vergleich zu anderen Energieträgern am größten. Unter den erneuerbaren Energien (ohne erneuerbaren Strom bzw. Fernwärme) war Holzenergie der wichtigste Energieträger für Haushalte. In Zukunft soll der Beitrag von erneuerbaren Energien im Energiemarkt weiter steigen.

In Anbetracht der Bedeutung für den Holzmarkt und der Ausbauziele für den Energiesektor ist ein gutes Verständnis über Einflüsse auf die Entwicklung der Holznutzung in Haushalten wichtig. Vor diesem Hintergrund wurde ein ökonometrisches Modell berechnet, mit dem die Wirkungszusammenhänge relevanter Faktoren auf den energetischen Holzeinsatz in Haushalten untersucht wurden. Die Modellierung basiert auf einem Datensatz von 21.616 Haushalten zu den Jahren 2005, 2010 und 2014. Der Datensatz enthält Informationen zum Brennholzeinsatz in Haushalten als abhängige Variable sowie unabhängige Variablen, die Variationen im haushaltsspezifischen Brennholzeinsatz erklären können. Es wurde zwischen unabhängigen Variablen zu 1) Heiztechnologie, Haushaltseigenschaften und alternativen Energiepreisen; 2) Zugang zu Holzrohstoffen und Wetter sowie; 3) soziodemografischen Eigenschaften unterschieden. Da ein Großteil der Wohnungen des Haushaltssektors nicht mit Holz heizt, wurde für die Analyse ein linkszensiertes Tobit-Modell verwendet. Dieses Modell hat den Vorteil, dass es die Haushalte, die kein Brennholz nutzen, gesondert betrachtet und damit Aussagen über den gesamten Haushaltssektor zulässt.

In den Jahren 2005, 2010 und 2014 verbrauchten deutsche Haushalte durchschnittlich 0,75 bis 1,19 m³ Holz pro Jahr. Die verwendete Heiztechnologie hatte einen signifikanten Einfluss auf die Brennholznutzung. Haushalte mit Holzzentralheizungen wiesen einen, um 0,83 bis 1,82 m³, höheren jährlichen Holzverbrauch auf als Haushalte ohne Holzzentralheizungen. Jährliche Variationen in den Effekten werden durch Änderungen im Heizungsbestand sowie Effizienzsteigerungen von Holzzentralheizungen erklärt. Die Ergebnisse bestätigen, dass der energetische Holzeinsatz durch die Förderung von Holzzentralheizungen effizient gesteigert werden kann. An dieser Stelle sei angemerkt, dass eine genauere Betrachtung der Heiztechnologien die Aussagekraft des Modells verbessern könnte. In zukünftigen Studien sollte dieser Aspekt bei der Datenerfassung und Modellbildung berücksichtigt werden.

Außerdem war die energetische Holznutzung positiv mit der Wohnfläche korreliert und reagierte elastisch auf Änderungen im Fertigstellungsjahr. Auch Preise für alternative Energieträger (z. B. Gas, Heizöl) waren signifikant mit dem Brennholzeinsatz korreliert. Wenn die Preise um 100 \$US pro Tonne Rohöläquivalente stiegen, erhöhte sich der energetische Holzeinsatz in Haushalten um zusätzliche 0,05 bis 0,11 m³. Maßnahmen zur Verbesserung der preislichen Konkurrenzfähigkeit von Holz gegenüber alternativen Energieträgern könnten demnach den Brennholzeinsatz erhöhen.

Auch die Holzverfügbarkeit, die durch Variablen zum Waldbesitz und Walddichte gemessen wurde, war positiv mit der energetischen Holzverwendung in Haushalten assoziiert. Haushalte mit Waldbesitz verwendeten 0,27 bis 0,52 m³ mehr Holz pro Jahr als Haushalte, die keinen Wald besaßen. Wenn in der Region eines Haushalts die Walddichte hoch war, war auch der jährliche Holzverbrauch höher als in Haushalten aus Regionen mit niedriger Walddichte. Außerdem konnte gezeigt werden, dass der Holzverbrauch mit zunehmender Einwohnerdichte sinkt. Der Trend zur Urbanisierung kann demnach einen Rückgang des Holzverbrauchs bedeuten.

Elastizitäten von Heizgradtagen lagen bei 0,83 bis 1,15, was Vermutungen zu einem starken Einfluss der Temperatur auf den Holzverbrauch bestätigt. Beim Nettoeinkommen wiesen Haushalte der unteren und oberen Einkommenskategorien signifikant höhere Holzeinsätze auf, als Haushalte der mittleren Einkommenskategorie. Dies verwundert, da vor der Modellspezifizierung davon ausgegangen wurde, dass überwiegend Haushalte der unteren Einkommenskategorien, aufgrund von Preisvorteilen, Brennholz verwenden. Die positiven Effekte von Haushalten mit überdurchschnittlichem Einkommen sind auf das überproportionale Vorkommen von Brennholznutzern in diesen Einkommenskategorien zurückzuführen.

Die Ergebnisse geben Aufschluss über die Wirkungsrichtung und Größenordnung von Einflüssen auf die energetische Holzverwendung im Haushaltssektor, wodurch potenzielle Maßnahmen zur Beeinflussung der Holzverwendung abgeleitet werden können. Die Entscheidung über die Durchführung von Maßnahmen kann allerdings nur auf Grundlage eines politischen Diskurses, durch Abwägen der positiven und negativen Folgen einer energetischen Holznutzung, getroffen werden.

In Europa ist die Datenlage zur energetischen Holznutzung in Haushalten weniger detailliert als für Deutschland. Informationen zur energetischen Holznutzung werden von Statistiken des Energiesektors und der Forst- und Holzwirtschaft bereitgestellt. Der Joint Wood Energy Enquiry (JWEE) der UNECE/FAO ist die einzige Berichterstattung der Forst- und Holzwirtschaft, die Aussagen zur Brennholznutzung im Haushaltssektor zulässt. Der

Vergleich der Statistiken zeigte, dass Angaben der Energiestatistiken untereinander gute Übereinstimmungen aufweisen. Statistiken der Forst- und Holzwirtschaft weisen im Vergleich zur Energiestatistik Unterschiede auf, die auf die Verwendung unterschiedlicher Datenquellen und Umrechnungsfaktoren zurückzuführen sind. Allerdings sind für das Jahr 2015 alle Statistiken in der Aussage konsistent, dass der deutsche Haushaltssektor im europäischen Vergleich, nach Frankreich und Italien, die drittgrößte Brennholzmenge einsetzte. In den skandinavischen Ländern waren die Holzeinsätze, aufgrund der niedrigen Bevölkerungszahlen, gering.

Um die Vergleichbarkeit der Statistiken zu verbessern, ist eine engere Zusammenarbeit der relevanten Akteure nötig. Deutschland ist ein gutes Beispiel für eine erfolgreiche Zusammenarbeit. Durch die Verwendung der gleichen Datenbasis ab dem Jahr 2018 werden die Angaben beider Statistiken übereinstimmen. Außerdem sind allgemeingültige Umrechnungsfaktoren notwendig, um eine sektorübergreifende Verwendung der Daten zu gewährleisten. Die berechneten Umrechnungsfaktoren können die Grundlage für eine Verschneidung beider Statistiken bilden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit tragen zu einem besseren Verständnis der energetischen Holzverwendung in deutschen und europäischen Haushalten bei. Es wurde auf die Strukturen in den nationalen und internationalen Statistiken eingegangen. Außerdem wurde die

Bedeutung der energetischen Holznutzung für die erneuerbaren Energien in Deutschland und die nachhaltige Holznutzung diskutiert. Da Holzenergie sowohl für die Forst- und Holzwirtschaft als auch den Energiesektor relevant ist, wurde ein Verfahren zur Berechnung von Umrechnungsfaktoren entwickelt, das alle relevanten Sortimenten berücksichtigt. Die Umrechnungsfaktoren verbessern die Präzision und Vergleichbarkeit der deutschen und europäischen Statistiken. Außerdem ermöglichen transparente Umrechnungsfaktoren eine bessere Kommunikation zwischen den Sektoren der Forst- und Holzwirtschaft sowie des Energiesektors, was die Grundlage für eine genauere Statistik und die Bewertung der nachhaltigen Holznutzung darstellt. Die Analyse der Wirkungszusammenhänge zwischen dem Holzeinsatz in deutschen Haushalten und äußeren Einflüssen erbrachte wichtige Erkenntnisse über Mechanismen der energetischen Holzverwendung in einem der bedeutendsten Verwendungssektoren, dem Haushaltssektor. Auf Grundlage dieser Ergebnisse können Variationen im Holzeinsatz des Haushaltssektors nachvollzogen und Maßnahmen zur Beeinflussung der Holzverwendung abgeleitet werden.

Englische Zusammenfassung

Households source wood energy from primary, secondary and tertiary sources. Forest products and energy statistics provide information on residential wood energy consumption. Structure and level of detail differs by statistics. For instance, forest products statistics distinguish forest products very well and measure quantities in volume or weight. Energy statistics consider wood resources in a more aggregated form, e.g. as solid biofuels inclusive of woody and non-woody biomass, and use energy units as a common measure. Thus, units have to be harmonized prior to data comparison. Forest products statistics appear most suitable for conversion due to the high level of detail in considered forest products.

Converting between energy units and the units used to measure forest products requires accounting for a host of variables that vary by wood species (e.g., density, volume change and heating value). For the sake of reducing level of detail, growing stock composition by wood species denoted weights to compute average properties for coniferous and non-coniferous wood. In addition, coniferous wood compositions and moisture content were estimated for relevant forest products. Information on wood properties as well as forest products' properties facilitate computation of conversion factors.

Results suggest that conversion factors relative to weight range from 14.36 to 17.05 MJ/kg in Germany and 14.51 to 17.00 MJ/kg in EU28. Conversion factors relative to volume range from 7,638 to 10,252 MJ/m³ in Germany and 7,953 to 9,965 MJ/m³ in EU28. Variation is due to differences in forest products' properties. Moisture content denoted a variable that showed the strongest effects on conversion factors. In particular, factors relative to weight changed significantly when moisture content changed. Factors relative to volume changed when moisture content was below 30 %. Available literature confirms results. In addition, computed conversion factors were more detailed compared to the ones provided by the literature and allow for a more accurate conversion of forest products statistics. It has to be acknowledged however that collection of empirical data (e.g. moisture content) could further improve conversion quality.

In Germany, residential wood energy consumption data is gathered through empirical studies. Methodology for obtaining national data is similar among studies. In general, individual wood energy consumption data is obtained through household surveys and extrapolated for the entire nation based on national census data. In the absence of empirical data, wood energy consumption is predicted through statistical models. Data providers such as the working group on renewable energy statistics (AGEE-Stat) and the working group on energy balances (AGEB) use empirical data to produce official statistics. Official statistics show inconsistencies due to different data sources and revisions. From 2018 onwards, data providers will use the same data source which will likely result in a more consistent dataset.

Empirical data suggest that residential wood energy consumption in Germany increased from 142 to 284 PJ (15 to 30 M. m³) in 2000-2010 period. Since 2010, consumption dropped to 236 PJ (25 M. m³) in 2017. Comparison of data sources reveal substantial differences. Deviations can result from random and systematic sampling errors as well as application of different conversion factors and modelling approaches. Data on forest products suggest that households consume major shares of split logs sourced from forests. In 2000-2014 period absolute consumption of split logs increased, while relative contribution to total wood energy use decreased. Increasing demand for wood pellets explains the decreasing relative

contribution of split logs. Consumption of post-consumer recovered wood was low in the residential sector due to legislative restrictions.

Wood used for energy conversion became increasingly relevant in the German forest products market. Since 2009 the volume used for energy conversion equals the volume used for material purposes. Household consumed the second largest wood volumes, sourcing major shares of wood directly from forests. Despite its important role in forest products markets, wood energy represented a minor fuel in the German energy sector. Energy supply is dominated by imported fossil fuels. Gas and oil denoted the most important energy resources in final energy consumption of the residential sector. Although renewable energies accounted for a minor share in final energy consumption, relative contribution increased the most in past years. Wood energy represented the most important energy source in final renewable energy consumption (excluding renewable energies in electricity and heat). The relevance of renewable energies is expected to increase in the future due to corresponding policy targets.

The importance to the forest products market and increasing relevance to the energy sector call for a better understanding of factors associated with residential wood energy use. An econometric model was specified on a dataset including household level wood energy data as well as additional information on 1) heating technology, dwelling characteristics and alternative energies; 2) woody biomass accessibility and weather; as well as 3) households' socio demographic characteristics. The dataset comprised information from a total of 21,616 households that were enquired to report information for 2005, 2010 and 2014 respectively. A left censored Tobit model was chosen to analyze variation in wood energy consumption levels because it accounts for large number of zero responses and allows for analyzing the entire residential sector.

Results suggest that German households consumed on average 0.75 to 1.19 m³ wood per year in 2005, 2010 and 2014 respectively. Heating technology showed strongest effects on wood energy use among categorical variables. Households that used central heating systems consumed an additional 0.83 to 1.82 m³ per year. Annual variation of the effects is explained by changes in heating inventory and improvements in heater efficiency. Results provide evidence that promotion of central wood heating systems effectively increases residential wood energy consumption. It has to be acknowledged however, that more detailed information on heating technology will likely improve model results and should be considered in future research.

Residential wood energy consumption showed positive correlation with residence area and elastic response to year of building construction. In addition, prices for alternative energies (e.g., gas and heating oil) were significantly correlated with household's wood energy use. An increase in prices of 100 \$US per tons of oil equivalents resulted in additional 0.05 to 0.11 m³ wood consumption. Results provide evidence that improvements in price competitiveness over competing alternative fuels can lead to greater wood energy demand in the residential sector.

Accessibility of woody biomass, measured through forest ownership and forest density significantly affected residential wood energy consumption. Households that owned forests consumed 0.27 to 0.52 m³ more wood per year compared to households that didn't own forestland. In addition, wood energy consumption was higher in areas with denser forest cover. Results for a similar variable on population density suggest that wood energy

consumption decreased proportionally with increasing population density. Consequently, an increase in urban population might diminish residential wood energy consumption.

Elasticities for degree days ranged from 0.83 to 1.15 confirming expectations of a strong influence of temperature on residential wood energy use. Among socio demographic variables, households at lower and higher income levels showed greater wood energy consumption. Findings contradict initial hypothesis that low-income households consume more wood due to price advantages. Overrepresentation of wood energy consumers in high-income households explains this effect.

Model results identify variables that show significant association with residential wood energy consumption. In addition, model results provide indication for potential public policies that can influence residential wood energy demand. Choices in favor or against the support of wood energy have to be made in a democratic discourse however, balancing positive and negative consequences of wood energy use.

Assessment of European forest products and energy statistics revealed that residential wood energy consumption data is less detailed compared to German data. Among forest products statistics, the UNECE/FAO Joint Wood Energy Enquiry (JWEE) denotes the sole reporting scheme, which provides detailed information on residential wood energy use for some EU member states. Comparison of data sources revealed good data consistency among data providers associated with energy statistics. Comparison of energy and forest products statistics revealed inconsistencies, which might result from the use of different data sources or conversion factors. However, statistics consistently reported that most wood energy is consumed in French and Italian residential sectors, followed by German households. Scandinavian households showed surprisingly low wood energy consumption presumably due to a smaller population.

Data inconsistencies among forest products and energy statistics call for the need of a closer collaboration between relevant stakeholders. Germany denotes a good example for a good collaboration of relevant stakeholders. The use of the same data source in forest products and energy statistics will harmonize both statistics in the future. In addition, universal conversion factors ensure consistent data too and can provide the basis for harmonization of forest products and energy statistics.

This thesis provides a better understanding of wood energy consumption in German and European residential sectors. The structure of national and international statistics has been explained. In addition, the relevance of residential wood energy use for renewable energies in the German energy sector as well as sustainable use of forest resources has been discussed. Taking into account that wood energy is relevant to forest products and energy statistics, a transparent method for computation of conversion factors has been provided. Conversion factors improve precision and allow for comparison of both statistics. Universal conversion factors also allow for a better communication between sectors and can be used to assess sustainable use of forest resources. An analysis of factors affecting residential wood energy consumption provided information that explain variations in wood energy consumption in one of the most important wood consuming sectors, the residential sector. Results allow for development of public policies to influence residential wood energy use.

Eidesstattliche Versicherung

Hiermit erkläre ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Dissertationsschrift selbst verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Hamburg,

Sebastian Glasenapp