

TEXTE

192/2020

Potenziale von Bauen mit Holz

Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv- und Holzbauweise

TEXTE 192/2020

Projektnummer 98401

FB000320

Potenziale von Bauen mit Holz

Erweiterung der Datengrundlage zur Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau sowie vergleichende Ökobilanzierung von Häusern in Massiv- und Holzbauweise

von

Tobias Wolf (Projektleitung), Andrea Untergutsch (Kap. 3, Kap. 4 – AP 1.4), Christoph Wensing (Kap. 8), Dr. Heidi Mittelbach (Kap. 4 – AP 1.3, Kap. 5, 6, 7), Feng Lu-Pagenkopf (Kap. 5), Daniel Kellenberger (Kap. 8)

Intep – Integrale Planung GmbH, Berlin

Petra Kubowitz (Kap. 1, 2)


Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (IaFB)
e.V., Berlin


Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber

Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel : +49 340-2103-0
Fax : +49 340-2103-2285
info@umweltbundesamt.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

 [/umweltbundesamt.de](https://www.facebook.com/umweltbundesamt.de)

 [/umweltbundesamt](https://twitter.com/umweltbundesamt)

Durchführung der Studie:

Intep – Integrale Planung GmbH
Bertolt-Brecht-Platz 3
10117 Berlin

mit

Institut für angewandte Forschung im Bauwesen (IaFB) e.V.
Kaiserin-Augusta-Allee 14
Haus 2, Obergeschoss 4
10553 Berlin

Abschlussdatum:

Dezember 2019

Redaktion:

Fachgebiet III 2.2 Ressourcenschonung, Stoffkreisläufe, Mineral- und Metallindustrie
Maresa Breitmeier, Fachgebietsleitung Hermann Keßler

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Oktober 2020

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Potenziale von Bauen mit Holz

Die Studie Potenziale von Bauen mit Holz hat zum Ziel, die Datengrundlage zum Thema Verfügbarkeit von Holz als Baustoff zum Einsatz im Holzbau zu erweitern sowie ein Review zu vergleichenden Ökobilanzen von Häusern in Massiv- und Holzbauweise durchzuführen.

Es werden zunächst die Holzqualitäten der unterschiedlichen Holzbauweisen definiert und deren Bedeutung und Verwendbarkeit im Bauwesen zugeordnet. Des Weiteren wird die Fragestellung behandelt, wie groß das Potenzial des national verfügbaren Holzes ist, wie sich die regionale Verteilung innerhalb Deutschlands darstellt und in welchem Umfang Holz bei gesteigerter Holzbauquote zusätzlich aus anderen Ländern importiert werden und welchen Qualitätsanforderungen dieses entsprechen müsste. Es wird außerdem beschrieben, welche Konkurrenz zu anderer stofflicher Holznutzung sowie zu energetischer Nutzung entsteht und ob Kaskadennutzung diese Konkurrenz potentiell mindern kann. Darüber hinaus wird die Auswirkung einer Steigerung der Holzbauquote unter der Annahme untersucht, dass diese Steigerung nicht mit einem Import von Hölzern gedeckt wird, sondern ob sie mit einer Vergrößerung der forstwirtschaftlichen Flächen im Inland bewältigt werden kann. Wald und Holznutzung tragen auf unterschiedliche Weise zum Klimaschutz bei, denn Bäume binden Kohlendioxid und können Treibhausgasemissionen durch die Substitution von mineralischen und fossilen Rohstoffen durch Holz reduzieren.

In einem Review vergleichender Ökobilanzen von Massiv- und Holzhäusern aus wissenschaftlichen Journalen und Berichten werden Primärenergie und das Treibhauspotenzial für Gebäude mit einer näherungsweise einheitlichen funktionellen Äquivalenz ausgewertet. Zudem wird eine Sensitivitätsanalyse zur Identifikation der entscheidenden Einflussgrößen, die das Ergebnis bei einem direkten Vergleich der beiden Bauweisen beeinflussen bzw. über die Höhe des Substitutionspotenzials von Holz hinsichtlich der Umweltindikatoren entscheiden, durchgeführt.

Abstract: Potentials of Building with Wood

The study Potentials of Building With Wood aims to expand the data basis on the availability of wood as a building material for use in timber construction. Moreover, it shall conduct a review of life cycle assessments of houses in solid and timber construction.

First, the wood qualities of the different wood construction methods will be defined and their significance and applicability in the building industry will be assigned. In addition, the following questions will be addressed: how large is the potential of the nationally available wood; how is the regional distribution of wood in Germany; to what extent must wood be imported from other countries when the wood construction quota in Germany increases, and which quality requirements this wood would have to meet. Furthermore, it is described which competition arises to other material wood use as well as to energetic use and whether cascade use can potentially reduce this competition. In addition, the effect of an increase in the timber construction quota will be investigated under the assumption that this increase is not covered by an import of timber, but can be managed by an increase in domestic forestry areas. Forests and wood use contribute in different ways to climate protection, because trees bind carbon dioxide and can reduce greenhouse gas emissions by substituting wood for mineral and fossil raw materials.

In a review of comparative life cycle assessments of solid and timber houses from scientific journals and reports, primary energy and the global warming potential for buildings are evaluated with an approximately uniform functional equivalence. In addition, a sensitivity analysis is carried out to identify the variables which influence the result in a direct comparison of the two construction methods and which determine the level of the substitution potential of wood with regard to the environmental indicators.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	6
Abbildungsverzeichnis	11
Tabellenverzeichnis	14
Abkürzungsverzeichnis	17
Zusammenfassung	21
Fazit	28
Summary	33
Conclusion	40
1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise	45
1.1 Verfügbarkeit von Konstruktionsholz als Baustoff	45
1.2 Vergleichende Ökobilanzen von Holz- und Massivhäusern	46
2 Holzqualitäten für Holzbauweisen (AP 1.1)	47
2.1 Überblick	47
2.2 Einsetzbare Holzbaustoffe und Holzwerkstoffe	48
2.2.1 Allgemeines	48
2.2.2 Holzbaustoffe (Bauprodukte aus Vollholz)	52
2.2.2.1 Vollholz (VH)	52
2.2.2.2 Konstruktionsvollholz (KVH)	53
2.2.2.3 Balkenschichtholz (BaSH)	53
2.2.2.4 Brettschichtholz (BSH bzw. GL)	54
2.2.2.5 Brettsperrholz (BSP)	54
2.2.2.6 Brettstapelholz	54
2.2.2.7 Massivholzplatten (SWP)	54
2.2.2.8 BauBuche	55
2.2.3 Holzwerkstoffe (Bauprodukte aus Furnieren, Spänen, Fasern)	55
2.2.3.1 Furnierschichtholz (FSH)	55
2.2.3.2 Sperrholz (FU bzw. BFU)	55
2.2.3.3 Spanplatten	56
2.2.3.4 Holzfaserplatten	56
2.2.3.5 OSB-Platten	56
2.2.3.6 Neuartige Holzwerkstoffe	56
2.2.4 Einstufung der Holzbauprodukte	57
2.3 Holzbauweisen	58

2.3.1	Allgemeines.....	58
2.3.2	Holztafelbau.....	58
2.3.3	Holzskelettbau	59
2.3.4	Nagelplattenbinder.....	60
2.3.5	Dachkonstruktionen – Steildächer.....	61
2.3.6	Massivholzbau	62
2.3.7	Holzbetonverbundbauweise / Holzhybridbauweise.....	63
2.3.8	Hallenbau – Holzbinderkonstruktionen.....	63
2.3.8.1	Brettschichtholzbinder und -stützen	64
2.3.8.2	Fachwerkbinder	64
2.4	Einsetzbare Holzarten und -qualitäten	65
2.4.1	Allgemeines.....	65
2.4.2	Holzarten für Holzbaustoffe und Holzwerkstoffe.....	67
2.4.3	Holzbaustoffe und Holzwerkstoffe für die betrachteten Holzbauweisen	72
2.4.4	Zusammenfassung	73
3	National verfügbare Hölzer (AP 1.2)	75
3.1	Holzeinschlag in Deutschland 2017	75
3.1.1	Holzeinschlag nach Holzartengruppen	75
3.1.2	Holzeinschlag nach Holzsorten	81
3.1.3	Amtlich nicht erfasster Holzeinschlag.....	84
3.2	Zukünftiges Holzpotenzial Deutschlands	85
3.2.1	Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung WEHAM: Basis- und Alternativszenarien.....	85
3.2.2	Entwicklung des Hektarvorrats des Holzes und des Rohholzpotenzials in Deutschland	88
3.2.3	Regionale Entwicklung des Rohholzpotenzials.....	92
3.3	Gegenüberstellung von Derbholzverwendung und Rohholzpotenzial	95
4	Holzimport bei Steigerung der Holzbauquote (AP 1.3 und AP 1.4).....	98
4.1	Steigerung der Holzbauquote	98
4.1.1	Bauleistungen und Holzbauquote.....	98
4.1.2	Entwicklung der Holzverwendung im Bausektor und Steigerungspotenzial der Holzbauquote.....	99
4.2	Qualitätsanforderungen an zu importierendes Holz (Zertifizierungssysteme)	105
4.3	Holzimporte	109
5	Konkurrenz bei intensiverer Nutzung von Holz als Baustoff und Kaskadennutzung (AP 1.5).....	114

5.1	Konkurrenz bei intensiverer Nutzung von Holz als Baustoff	114
5.1.1	Stoffliche Nutzung.....	114
5.1.2	Energetische Nutzung.....	116
5.1.3	Mögliche künftige Entwicklungen und Handlungsbedarf.....	121
5.2	Kaskadennutzung.....	122
6	Flächeninanspruchnahme und Auswirkungen in Land- und Forstwirtschaft bei einer Steigerung der Holzbauquote (AP 1.6).....	128
6.1	Status quo und zeitliche Entwicklung der Flächeninanspruchnahme in Deutschland	128
6.2	Auswirkungen und Folgen bei Erhöhung forstwirtschaftlicher Flächen.....	134
6.2.1	Möglichkeiten für die Erhöhung forstwirtschaftlicher Flächen unter bestehenden Flächennutzungen.....	134
6.2.2	Auswirkungen der Erhöhung forstwirtschaftlicher Flächen und Folgen für die Umwelt.....	136
7	Implikationen der Waldnutzung (AP 1.7).....	139
7.1	Funktionsvielfalt des Waldes	139
7.2	Auswirkung der Waldnutzung auf Kohlenstoffspeicherung und Treibhausgasemissionen	140
8	Vergleichende Ökobilanzen von Massiv- und Holzhäusern (Arbeitspaket 2).....	143
8.1	Grundlagen.....	143
8.1.1	Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	143
8.1.2	Ökobilanzierung von Gebäuden	143
8.1.2.1	Entstehung.....	143
8.1.2.2	Normung.....	144
8.1.2.3	Methodik.....	144
8.1.2.4	Allokation.....	147
8.1.2.5	Funktionelle Einheit	147
8.1.2.6	Datenbanken.....	148
8.2	Vorgehen Review vergleichende Ökobilanzen	148
8.3	Resultate vergleichender Ökobilanzen	150
8.3.1	Überblick Parameter des Ökobilanzmodells.....	150
8.3.1.1	Normung.....	150
8.3.1.2	Lebenszyklusphasen	150
8.3.1.3	Umweltindikatoren.....	152
8.3.1.4	Verwendete Softwaretools.....	153
8.3.1.5	Verwendete Datenbanken.....	153
8.3.1.6	Aktualität	154

8.3.1.7	Motivationsgrundlagen	154
8.3.1.8	Betrachtungszeitraum	154
8.3.1.9	Lebensdauer von Bauteilen	154
8.3.2	Überblick bauliche Parameter	154
8.3.2.1	Gebäudetyp	154
8.3.2.2	Standort	155
8.3.2.3	Energiestandard.....	155
8.3.2.4	Thermischer Komfort, Schallschutz und Brandschutz	155
8.3.2.5	Haustechnik	155
8.3.2.6	Weitere Vergleichsaspekte	155
8.3.2.7	Bauliche Systemgrenze	156
8.3.3	Standardisierung von Ökobilanzen für Gebäude.....	156
8.3.4	Auswertung Umweltindikator Primärenergieverbrauch	157
8.3.5	Auswertung Umweltindikator Treibhauspotenzial.....	173
8.3.6	Innenraumluftqualität bei Holz- und Massivbau	193
8.4	Analyse von einzelnen Einflussgrößen.....	195
8.4.1	Einfluss unterschiedlicher Konstruktionsweisen	195
8.4.1.1	Betrachtungsschwerpunkte.....	195
8.4.1.2	Vergleich unterschiedlicher Konstruktionsweisen je Bauweise	196
8.4.2	Transportdistanz	200
8.4.3	Nachwuchspotenzial von Holz	208
8.4.4	Modul D – Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze.....	213
8.4.5	Technische Gebäudeausstattung.....	214
8.4.6	Geschossigkeit	215
8.4.7	Energiestandard.....	217
8.4.8	Betrachtungszeitraum	220
8.4.9	Lebensdauer von Bauteilen	222
8.4.10	Dämmstoffe	225
8.4.11	Kellergeschoss.....	226
8.4.12	Datenbanken.....	227
8.5	Zusammenfassung zum Arbeitspaket 2: Vergleichende Ökobilanzen von Holz- und Massivhäusern	229
9	Quellenverzeichnis	231
9.1	Quellenverzeichnis zu AP 1.1	231

9.2	Quellenverzeichnis zu AP 1.2 bis 1.4.....	232
9.3	Quellenverzeichnis zu AP 1.5	234
9.4	Quellenverzeichnis zu AP 1.6 und 1.7	235
9.5	Quellenverzeichnis zu AP 2	236
A	Anhang	239
A.1	Literaturrecherchematrix.....	239
A.2	Analysematrix	244

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Baubereiche mit verbauten Holzarten in 1000 m ³ (b) – Baukubikmeteräquivalent	47
Abbildung 2:	Regelungen der Holzbauprodukte (Holzbaustoffe und Holzwerkstoffe)	48
Abbildung 3:	Verwendete Holzhalbwaren in 1000 m ³ (b) – Baukubikmeteräquivalent	49
Abbildung 4:	Verwendete Holzarten in 1000 m ³ (b) – Baukubikmeteräquivalent	49
Abbildung 5:	Verwendete Holzhalbwaren in Prozent (vom insgesamt verbauten Holz)	50
Abbildung 6:	Verwendete Holzarten in Prozent (vom insgesamt verbauten Holz).....	50
Abbildung 7:	Verwendbarkeit und Verfügbarkeit von Holzbauprodukten aus Laubholz.....	51
Abbildung 8:	Zuordnung von Schnittholz zu Sortier- und Festigkeitsklassen.....	53
Abbildung 9:	Zuordnung von Schnittholz zu Sortier- und Festigkeitsklassen.....	57
Abbildung 10:	Lastabtrag einer Holztafel	58
Abbildung 11:	Schematischer Aufbau einer Holztafel	59
Abbildung 12:	Prinzipdarstellung eines Holzskelettbaus.....	60
Abbildung 13:	Abbildung Nagelplatte und Prinzipdarstellung Nagelplattenbinder.....	61
Abbildung 14:	Pfetten- und Sparrendächer	62
Abbildung 15:	Massivholzbau mit Brettstapeldecke, Unterzügen und Brettsperrholzwänden.....	62
Abbildung 16:	Prinzip Holzbetonverbunddecke	63
Abbildung 17:	Brettschichtholz binder einer Hallenkonstruktion	64
Abbildung 18:	Genehmigungen von Eigenheimen nach Bauweisen	65
Abbildung 19:	Fertigstellungen im Wohnungsbau nach Bauweisen (Stand 2017) – prozentual	66
Abbildung 20:	Anteile der Holzarten am Holzeinschlag, 2017	77
Abbildung 21:	Anteile der verschiedenen Waldeigentümergruppen an Holzeinschlag und Waldfläche.....	78
Abbildung 22:	Anteile der Bundesländer an Holzeinschlag und Waldfläche Deutschlands	79
Abbildung 23:	Waldverteilung in Deutschland, 2012	80
Abbildung 24:	Holzeinschlag nach Holzsorten für die vier Holzartengruppen nach Bundesländern 2017	82
Abbildung 25:	Anteile der Holzsorten an den verschiedenen Holzartengruppen, Holzeinschlag 2017.....	83
Abbildung 26:	Anteile der Holzartengruppen an den verschiedenen Holzsorten, Holzeinschlag 2017	83
Abbildung 27:	Holzeinschlag in Deutschland 1995-2017.....	84

Abbildung 28:	Holzrohstoffbilanz Deutschlands 2015.....	85
Abbildung 29:	Entwicklung der Baumartenflächen von 2012 zu 2052 in den drei WEHAM-Szenarien	87
Abbildung 30:	Holzvorratsentwicklung in den WEHAM-Szenarien	89
Abbildung 31:	Mittleres projiziertes Rohholzpotenzial in den WEHAM-Szenarien über den Zeitraum der Modellierungsperiode 2013-2052.....	90
Abbildung 32:	WEHAM-Basisszenario: Mittlerer projizierter Vorrat [Mio. m ³ /a] des Rohholzpotenzials nach Holzsorten für die Holzartengruppen für die Betrachtungsperiode 2013-2052.....	92
Abbildung 33:	WEHAM-Basisszenario: Jährliches Rohholzpotenzial im Mittel der Jahre 2013-2052 in Deutschland (in Mio. m ³ /a Efm einschließlich nicht verwertbarer Anteile)	94
Abbildung 34:	Gegenüberstellung Inlandsverwendung, Waldnutzung und mittleres Derbholzpotenzial (nur verwertbar, nach Abzug Totholzvorrat).....	97
Abbildung 35:	Bauleistungen nach Sektoren, Stand 2016.....	98
Abbildung 36:	Baubereiche nach Holzarten, Stand 2012	100
Abbildung 37:	Verwendete Holzhalbwaren nach Baubereichen, Stand 2012.....	100
Abbildung 38:	Verwendete Faserrohstoffe (Verbaut und Verschnitt), Stand 2012.....	100
Abbildung 39:	Gegenüberstellung der Szenarienergebnisse zu Entwicklungen der inländischen Produktion und des Verbrauchs von Nadel- und Laubrohholz.....	105
Abbildung 40:	Weltweit FSC-zertifizierte Waldfläche, Stand 01.06.2018	107
Abbildung 41:	Weltweit PEFC-zertifizierte Waldfläche, Dezember 2017	107
Abbildung 42:	Entwicklung der stofflichen Holzverwendung ⁵⁷	115
Abbildung 43:	Entwicklung der der stofflichen und energetischen Nutzung von Holz ⁵⁹	117
Abbildung 44:	Entwicklung der energetischen Holzverwendung.....	117
Abbildung 45:	Stoffliche und energetische Verwendung von Altholz in Deutschland 2001 bis 2013	119
Abbildung 46:	Übersicht einer exemplarischen Kaskadennutzung von Holz mit ihren einzelnen Stufen.....	122
Abbildung 47:	Qualitätsverteilung von Altholz aus Gebäudeabbrüchen im Jahr 2011 für den Freistaat Bayern.....	124
Abbildung 48:	Bodenflächenanteile nach tatsächlicher Nutzungsart, 2016	129
Abbildung 49:	Flächenanteile verschiedener Vegetationsnutzungsarten an der gesamten Vegetationsfläche, 2016	129
Abbildung 50:	Flächenanteile landwirtschaftlicher Betriebe und ausgewählter Hauptnutzungsarten, 2017.....	132
Abbildung 51:	Bestand repräsentativer Vogelarten in verschiedenen Landschafts- und Lebensraumtypen	137

Abbildung 52:	Die Funktionen des Ökosystems Wald	139
Abbildung 53:	Kohlenstoffvorräte im Wald gegliedert nach oberirdischer und unterirdischer Biomasse, Totholz, Streuauflage und Mineralboden	140
Abbildung 54:	Die Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040	145
Abbildung 55:	Umweltbelastung (in UBP) pro m ³ unspezifische Betonsorte	199
Abbildung 56:	Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen (Module A1 bis A5) am GWP	204
Abbildung 57:	Materialzusammensetzung und THG-Emissionen in Fallstudie B	207
Abbildung 58:	Materialkonzepte Gebäude, gesamt, nicht regenerierbar, nachwachsend	211
Abbildung 59:	Nachwuchspotenzial in kg CO ₂ /m ² BGF durch Holznutzung in den Objekten, relative Menge	212
Abbildung 60:	A – Vergleich von Klimawandelauswirkung pro m ² BGF für Stahlbeton und Holz B – Absolute Einsparung von Klimawandelauswirkung pro m ² BGF durch Substitution von Stahlbeton durch Holzbauweise	217
Abbildung 61:	Treibhauspotenzial unterschiedlicher Bauweisen und Energiestandards	219
Abbildung 62:	Vergleich Auswirkung des Heizwärmebedarfes bei unterschiedlichen Bauweisen	220
Abbildung 63:	Vergleich PE gesamt unterschiedlicher Bauweisen und Heizwärmeerzeuger	221
Abbildung 64:	Einfluss des Betrachtungszeitraumes auf das Treibhauspotenzial unterschiedlicher Bauweisen	222
Abbildung 65:	Übersicht Varianz der Austauschzyklen für Bauteile	223
Abbildung 66:	Einfluss des Betrachtungszeitraumes (RSP) auf die Lebenszyklusphasen für den Umweltindikator Treibhauspotenzial	224
Abbildung 67:	Einfluss des Betrachtungszeitraums (BZR=RSP) auf die Baukonstruktion und Haustechnik für den Umweltindikator Treibhauspotenzial	224
Abbildung 68:	Umweltindikatoren – Einfluss von nachwachsenden Dämmstoffen im Vergleich zu synthetischen Dämmstoffen	226
Abbildung 69:	Vergleich unterschiedlicher Datenbanken für den Umweltindikator Treibhauspotenzial für vier untersuchte Mehrfamilienhäuser in unterschiedlichen Bauweisen	228

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Fertigstellungen im Wohnungsbau nach Bauweisen (Stand 2017).....	66
Tabelle 2:	Einsatz von Holzarten bei den betrachteten Holzbaustoffen	67
Tabelle 3:	Einsatz von Holzarten bei den betrachteten Holzwerkstoffen	68
Tabelle 4:	Einsatz von Holzarten bei den betrachteten Holzbaustoffen	70
Tabelle 5:	Einsatz von Holzarten bei den betrachteten Holzwerkstoffen	70
Tabelle 6:	Verfügbarkeit von Holzqualitäten bei Laub- und Nadelhölzern.....	71
Tabelle 7:	Einsatz von Holzbaustoffen bei den betrachteten Holzbauweisen	73
Tabelle 8:	Einsatz von Holzwerkstoffen bei den betrachteten Holzbauweisen	73
Tabelle 9:	Einsatz von Holzbaustoffen und Holzarten bei den betrachteten Holzbauweisen	74
Tabelle 10:	Einsatz von Holzwerkstoffen und Holzarten bei den betrachteten Holzbauweisen	74
Tabelle 11:	Gesamtholzeinschlag 2017 nach Holzartengruppen und Ländern.....	76
Tabelle 12:	Gesamtholzeinschlag 2017 nach Holzartengruppen und Waldeigentumsarten.....	77
Tabelle 13:	Anteile des Privatwaldes an den Waldflächen der Bundesländer im Jahr 2012	79
Tabelle 14:	Informationen zu den WEHAM-Waldbehandlungsszenarien	86
Tabelle 15:	Rohholzpotenziale – Werte verschiedener Quellen.....	91
Tabelle 16:	WEHAM-Basisszenario: Rohholzpotenzial der Bundesländer sowie ihr Anteil am Gesamtpotenzial in den Jahren 2013-2052 und Angabe des Waldanteils gemäß BWI 2012	92
Tabelle 17:	Vergleich der Holzverwendung 2016 mit den mittleren WEHAM-Derbholz-potenzialen 2013-2052	96
Tabelle 18:	Prozentualer Anteil der Anzahl der Wohnungen bzw. Gebäude in überwiegender Holzbauweise an Fertigstellungen	99
Tabelle 19:	Mittleres Steigerungspotenzial der Waldholznutzung für die Periode 2013-2052	101
Tabelle 20:	Theoretisches mittleres Steigerungspotenzial der Holzbauquote für die Periode 2013-2052 (ohne Steigerungen in anderen Wirtschaftsbereichen).....	102
Tabelle 21:	WEHAM-Holzverwendungsszenarien.....	103
Tabelle 22:	Zertifizierungssysteme für nachhaltige Waldbewirtschaftung im Überblick.....	106
Tabelle 23:	Anteile zertifizierter Waldflächen ausgewählter Länder weltweit.....	108
Tabelle 24:	Holzaußenhandel von Nadelrohholz und Laubrohholz der Bundesrepublik Deutschland mit den EU-Ländern in 1.000 m ³	110

Tabelle 25:	Ausgewählte Anforderungen an Holzimporte und zu erwartende Entwicklung für europäische Länder mit Selbstversorgungsgrad von Holz (Nadel- und Laubholz gesamt) von über 100 %.....	113
Tabelle 26:	Anteile der eingesetzten Holzsortimente in Privaten Haushalten, Kleinfeuerungsanlagen und Großfeuerungsanlagen	118
Tabelle 27:	Überblick über verschiedene Holzarten und deren Verwendungsmöglichkeit für stoffliche und energetische Nutzung	120
Tabelle 28:	Anteile der Nutzungsarten an der Bodenfläche 2016 nach regionaler Gliederung in Deutschland.....	130
Tabelle 29:	Anteile der Fläche für Vegetation und ihrer Nutzungsarten an der Bodenfläche 2016 nach regionaler Gliederung.....	131
Tabelle 30:	Flächenanteile (in 1000) landwirtschaftlicher Betriebe und ausgewählter Hauptnutzungsarten 2017 nach regionaler Gliederung	133
Tabelle 31:	Beitrag der deutschen Forst- und Holzwirtschaft zum Klimaschutz in Mio., 2014	141
Tabelle 32:	Abweichung Primärenergieverbrauch der Holz- ggü. der Massivbauweise in %.....	157
Tabelle 33:	Übersicht Vergleich Primärenergieverbrauch gesamt und nicht erneuerbar.....	159
Tabelle 34:	Abweichung Treibhauspotenzial der Holz- gegenüber der Massivbauweise in %.....	173
Tabelle 35:	Übersicht Vergleich des Treibhauspotenzials zwischen Massiv- und Holzbauweise	175
Tabelle 36:	Anteile der Module A bis C für den Umweltindikator Treibhauspotenzial	192
Tabelle 37:	Übersicht über die Umweltauswirkungen der natürlichen Gesteinskörnung und der Recycling-Gesteinskörnung	200
Tabelle 38:	Durchschnittliche Distanzen der Halbwaretransporte zu den Hausherstellern	201
Tabelle 39:	Transportdistanzen zwischen den Hausherstellern und den Baustellen	202
Tabelle 40:	Herkunft der Holzbaustoffe.....	202
Tabelle 41:	Anteile der einzelnen Module an den gesamten Umweltwirkungen (Module A1 bis A5)	203
Tabelle 42:	Absolute THG-Emissionen in Tonnen für jeweils ein Gebäude in Betonbauweise und Holzbauweise	206
Tabelle 43:	Nachwuchspotenziale für wesentliche Holzprodukte aus den Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche	209
Tabelle 44:	Zuwächse, Rohdichten und C-Bindung der Hauptbaumarten.....	210

Tabelle 45: Klimawandelauswirkung pro m² BGF für alle Gebäudetypen in Stahlbeton und Holz. Die Einsparungen zeigen die eingesparten THG-Emissionen bei Substitution einer Stahlbeton- durch eine Holzkonstruktion.216

Abkürzungsverzeichnis

AbfRL	Abfallrahmen-Richtlinie
ADPE	Abiotic Depletion Potential for Elements (zu Deutsch: Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen)
ALH	Sonstige Laubhölzer mit hoher Lebensdauer
ALN	Sonstige Laubhölzer mit niedriger Lebensdauer
AltholzV	Altholzverordnung
AP	Arbeitspaket
atro	absolut trocken
BAS	Basisszenario
BaSH	Balkenschichtholz
BBR	Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
BFU	Baufurniersperrholz (auch Furniersperrholz FU)
BGF	Bruttogrundfläche
BL	Bundesland
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BMI	Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BNB	Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen
BRI	Brutto-Rauminhalt
BSH	Brettschichtholz, auch als GL bezeichnet
BSP	Brettsperrholz
BST	Baustabsperrholz
BSTAE	Baustäbchensperrholz
B-StapelH	Brettstapelholz
BWI	Bundeswaldinventur
BZR	Betrachtungszeitraum
C	Nadelholz (coniferous wood) – Angabe für Nadelholzfestigkeitsklassen, z. B. C24
CE	Communautés Européennes (zu Deutsch: Europäische Gemeinschaften)
CLP	Chemikalien-Verordnung (Classification, Labelling and Packaging of substances and mixtures)
D	Laubholz (deciduous wood) – Angabe für Laubholzfestigkeitsklassen, z. B. D35
DGNB	Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen
DH	Doppelhaus, Doppelhäuser
DHWR	Deutscher Holzwirtschaftsrat
DIN	Deutsches Institut für Normung
EE	Primärenergie aus erneuerbaren Quellen
EEG	Erneuerbare Energiegesetz

EFH	Einfamilienhaus, Einfamilienhäuser
Efm	Erntefestmeter
EfmD o.R.	Erntefestmeter Derbholz ohne Rinde
EN	Europäische Norm
ENe	Primärenergie aus nicht erneuerbaren Quellen
EnEV	Energieeinsparverordnung
EOL	End of Life
EP	Eutrofication Potenzial (zu Deutsch: Eutrophierungspotenzial)
EPD	Environmental Product Declaration (zu Deutsch: Umweltpunktdeklaration)
EPS	Expandiertes Polystyrol
EUTR	EU-Holzhandelsverordnung
EZFH	Ein- und Zweifamilienhäuser
FLEGT	Rechtsdurchsetzung, Politikgestaltung und Handel im Forstsektor (Forest Law Enforcement, Governance und Trade)
Fm	Festmeter
FÖR	Förderszenario
FSC	Forest Stewardship Council
FSH	Furnierschichtholz (auch als LVL bezeichnet)
FU	Furniersperrholz (auch Baufurniersperrholz BFU), Sperrholz
FW	Fachwerk
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GEA	Gross External Area (zu Deutsch: Bruttogrundfläche, BGF)
GewAbf-V	Gewerbeabfallverordnung
GFPM	Global Forest Products Model
GL	Brettschichtholz (gluelam bzw. glued-laminated), auch als BSH bezeichnet
GWP	Global Warming Potenzial (zu Deutsch: Treibhauspotenzial)
ha	Hektar
HAG	Holzartengruppe
HB	hard board (zu Deutsch: harte Faserplatte)
HBV	Holzbetonverbund
HDF	harte Faserplatte, auch als HB (hard board) bezeichnet
HolzSiG	Holzhandels-Sicherungs-Gesetz
HPS	Holzpräferenzszenario
Hrsg.	Herausgeber
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
ISO	International Organisation for Standardisation
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KVH	Konstruktionsvollholz
LCA	Life Cycle Analysis

LDF	Poröse Faserplatte, auch als SB (soft board) bezeichnet
LH	Laubholz
LMBV	Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH
LS	Laubholzsortierklasse – Angabe für Laubholzsortierklassen, z. B. LS10
LVL	Furnierschichtholz (laminated veneer lumber), auch als FSH bezeichnet
LZP	Lebenszyklusphase
m³(b)	Baukubikmeteräquivalent: gibt die Kubikmeter an, die ein Produkt im Gebäude einnimmt
MBH	medium board (zu Deutsch: mittelharte Faserplatte)
MDF	Mitteldichte Holzfaserverplatte
MFH	Mehrfamilienhaus
NABU	Naturschutzbund Deutschland e.V.
NH	Nadelholz
NKL	Nutzungsklasse
NPS	Naturschutzpräferenzszenario
NREL	National Renewable Energy Laboratory
NWG	Nichtwohngebäude
OPD	Ozone Depletion Potenzial (zu Deutsch: Ozonschichtabbaupotenzial)
OSB	OSB-Platte (oriented strand board, zu Deutsch: Platte aus ausgerichteten Spänen)
PE	Primärenergie
PEFC	Programme for the Endorsement of Forest Certification Schemes
PENR	Primärenergie aus nicht erneuerbaren Ressourcen
PER	Primärenergie aus erneuerbaren Ressourcen
PET	Gesamter Primärenergieaufwand
PflBeschauV	Pflanzenbeschauverordnung
PflSchG	Pflanzenschutzgesetz
pnV	Potenzielle natürliche Vegetation
POCP	Photochemical Ozone Creation Potenzial (zu Deutsch: Ozonschichtbildungspotenzial)
RC	Recycling Beton
REF	Referenzszenario
RES	Restriktionsszenario
RH	Reihenhaus, Reihenhäuser
RNE	Rat für Nachhaltige Entwicklung
RSP	Reference Study Period (zu Deutsch: Betrachtungszeitraum)
S	Sortierklasse – Angabe für Nadelholzsortierklassen, z. B. S10
SB	soft board (zu Deutsch: poröse Faserplatte)
SNBS	Standard Nachhaltiges Bauen Schweiz

sonst.	sonstiges
SRU	Rat der Sachverständigen für Umweltfragen
SWP	Massivholzplatte (solid wood panel)
THG	Treibhausgas
UBA	Umweltbundesamt
UBP	Umweltbelastungspunkte
UG	Untergeschoss
U-Wert	Wärmedurchgangskoeffizient
Ü-Zeichen	Übereinstimmungszeichen zur Kennzeichnung von geregelten und nicht geregelten Bauprodukten
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Vfm	Vorratsfestmeter
VH	Vollholz
VOC	Volatile Organic Compounds (zu Deutsch: flüchtige organische Verbindungen)
VVOC	Very Volatile Organic Compounds
WDVS	Wärmedämmverbundsystem
WEHAM	Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung
XPS	Polystyrol-Extruderschaumstoff
ZIE	Zustimmung im Einzelfall

Zusammenfassung

Holzqualitäten für Holzbauweisen (AP 1.1)

In Kapitel 2 wurde untersucht, welche Holzqualitäten für die verschiedenen Holzbauweisen im Hochbau einsetzbar sind. Dazu wurden zunächst einsetzbare Holzbau- und Holzwerkstoffe beschrieben, im Anschluss mögliche Holzbauweisen erläutert und die dafür einsetzbaren Holzprodukte dargestellt und schließlich die verwendbaren Holzarten bzw. Holzqualitäten zusammenfassend angegeben. Dabei wurde der Fokus auf die vergleichende Untersuchung von Nadel- und Laubholz sowie auf einen möglichen Laubholzeinsatz gelegt.

Es wurde gezeigt, dass als konstruktive Holzbauprodukte derzeit vorwiegend Nadelhölzer eingesetzt werden, und dargestellt, für welche Holzprodukte und Holzbauweisen der Einsatz von Laubholz kurz- oder längerfristig möglich wäre. Zusammenfassend ließ sich zeigen, dass sowohl bei Holzbau- als auch bei Holzwerkstoffen eine deutliche Steigerung des Laubholzanteils möglich wäre, wenn die entsprechenden Herstelltechnologien angepasst und die rechtlichen Grundlagen geschaffen würden. Neben dem teilweise noch nicht geregelten Einsatz stehen derzeit vor allem die höheren Kosten und das geringere Angebot einem höheren Laubholzeinsatz entgegen. Zum Teil sind jedoch auch einige typische Laubholzeigenschaften hinderlich. Bei Vollhölzern wird vor allem die zum Teil deutliche Krümmfähigkeit und die damit einhergehende begrenzte Länge gerader Bauteile als Einschränkung gesehen. Bei den übrigen Holzbau- und Holzwerkstoffen sind auch die zeit- und kostenintensive Trocknung, die zum Teil größeren Quell- und Schwindbeiwerte (die beim Trocknen zu Querschnittsverzerrungen oder Verdrehungen führen können), die Verklebung (Wahl geeigneter Klebstoffe, Klebstoffdicken, -auftrag etc.) und Keilzinkung sowie die Herstelltechnologie selbst noch näher zu untersuchen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Zudem ist die aufwändigere Montage (aufgrund höherer Wichte und zusätzlichem Vorbohren bei stiftförmigen Verbindungsmitteln) zu beachten.

National verfügbare Hölzer (AP 1.2)

In Kapitel 3 wurde die Fragestellung behandelt, wie groß das Potenzial des national verfügbaren Holzes ist und wie sich die regionale Verteilung innerhalb Deutschlands darstellt. Als Ausgangsbasis wurde hierfür der aktuelle statistisch erfasste Holzeinschlag Deutschlands des Jahres 2017 nach Holzarten, Holzsorten und Bundesländern ausgewertet. Dabei wurde auch auf die Mängel der statistischen Erfassung eingegangen, die zu einer Unterschätzung insbesondere des Energieholzanteils und einer Untererfassung des Einschlags des Jahres 2017 von ca. 25 % führen. In einem zweiten Schritt wurden die Entwicklung des Holzvorrats und des Rohholzpotenzials in Deutschland bis zum Jahr 2052 und die zur Berechnung dieser Daten erarbeiteten WEHAM-Waldbehandlungsmodelle vorgestellt. Für die Werte zum Rohholzpotenzial wurde auf die unterschiedlichen Angaben in verschiedenen Quellen hingewiesen. Darüber hinaus wurde anhand der regionalen Verteilung dargestellt, dass ca. 40 % des deutschen Rohholzpotenzials in den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg prognostiziert werden.

Durch Gegenüberstellung der Volumina der inländischen Derbholzverwendung und des damit einhergehenden Waldholzeinsatzes des Jahres 2016 mit den jeweils verwertbaren Rohholzpotenzialen der drei Waldbehandlungsszenarien konnten Aussagen abgeleitet werden, in welchem Umfang das nationale Rohholzpotenzial den nationalen Bedarf zukünftig zu decken vermag. Hierfür wurde jeweils das verwertbare Rohholzpotenzial nach Abzug des Totholzzielvorrats betrachtet. Demnach kann die Waldholznutzung des Jahres 2016 sowohl für Nadelholz als auch für Laubholz für die Periode bis 2052 aus den mittleren zukünftigen Rohholzpotenzialen gedeckt werden. In einem Szenario ist hierfür eine geringfügige Substitution von Nadel- durch Laubholz erforderlich. Eine Erhöhung des Imports würde bei Beibehaltung des Nutzungsniveaus von 2016 nicht erforderlich. Beim Laubholz wäre in allen drei Wald-

behandlungsszenarien sogar ein vollständiger Importverzicht möglich, beim Nadelholz nur im Holzpräferenzszenario.

Bei der Betrachtung der Inlandsverwendung zeigten die Szenarien unterschiedliche Ergebnisse. Im Fall des Holzpräferenzszenarios übersteigt das verwertbare Potenzial sowohl für Nadel- als auch für Laubholz die Inlandsverwendung deutlich. Ein Import von Holz ist nicht erforderlich. Beim Basis- und Naturschutzszenario ist jeweils nur das Laubholzpotenzial ausreichend groß, um die Inlandsverwendung abzudecken. Das Nadelholzpotenzial ist jeweils zu gering, um auf den Import von Holz bei gegebener konstanter Verwendung verzichten zu können. Beim Basisszenario ist jedoch das Gesamtholzpotenzial annähernd groß genug, um die Inlandsverwendung zu decken. Eine geringfügige Substitution des fehlenden Nadelholzpotenzials durch Laubholz würde daher einen Verzicht auf Holzimporte ermöglichen. Beim Naturschutzpräferenzszenario reicht das Laubholzpotenzial hingegen nicht aus, um das zu niedrige Nadelholzpotenzial auszugleichen. Hier besteht Importbedarf, jedoch insgesamt in einer etwas niedrigeren Größenordnung als in der Holzbilanz des Jahres 2016 ausgewiesen.

Holzimport bei Steigerung der Holzbauquote (AP 1.3 und 1.4)

In Kapitel 4 wurde untersucht, in welchem Umfang Holz bei gesteigerter Holzbauquote zusätzlich aus anderen Ländern, auch des nicht-europäischen Auslands, importiert werden und welchen Qualitätsanforderungen dieses entsprechen müsste.

Hierfür wurde zunächst erläutert, warum unter einer Steigerung der Holzbauquote die Erhöhung des Holzanteils über alle Bauleistungen verstanden wird. Daran anschließend wurde anhand der Ergebnisse aus Kapitel 3 das mittlere Steigerungspotenzial der Waldholznutzung und das theoretische mittlere Steigerungspotenzial der Holzbauquote für die Periode 2013-2052 ohne Erhöhung der Holzimportmengen berechnet. Letzteres setzt eine gegenüber dem Bezugsjahr konstante Derbholznutzung aller übrigen Holzverwendenden Wirtschaftszweige voraus und beträgt für das Basisszenario 25 %, für das Holzpräferenzszenario 220 % und für das Naturschutzpräferenzszenario 11 %.

Um auch die möglichen Steigerungen des Holzverbrauchs in anderen Wirtschaftszweigen bei der Ermittlung des Steigerungspotenzials im Holzbau zu berücksichtigen, wurden die Forschungsergebnisse der WEHAM-Holzverwendungsszenarien im Vergleich zu den Waldbehandlungsszenarien ausgewertet. Dabei zeigte sich, dass sich hieraus nicht ableiten lässt, welche Holzbausteigerungsquote mit dem je Waldbehandlungsszenario zur Verfügung stehenden Derbholzpotenzial umsetzbar wäre, ohne dass Nadelholz zu importieren ist. Dementsprechend ist aus den Forschungsergebnissen auch nicht ableitbar, in welchem Umfang Holz bei vorgegebener Steigerung der Holzbauquote zu importieren wäre. Hierfür wären weitere Untersuchungen erforderlich.

Unter der Annahme, dass durch eine Steigerung der Holzbauquote noch mehr Holzimporte notwendig sind, müssen verschiedene Qualitätsanforderungen einbezogen werden. Grundlage bilden für Deutschland bestehende EU-rechtliche und internationale Vereinbarungen, die der Zerstörung von Tropenwald, dem Raubbau und Inverkehrbringen von illegalem Holz vorbeugen. Auch müssen negative ökologische Effekte reduziert werden, wonach Transportwege für Holzimporte so gering wie möglich gehalten werden sollen, und resultierend der Import möglichst aus Anrainerstaaten erfolgen soll. Zur Vermeidung von ökologischen Verlagerungseffekten sollte Holz darüber hinaus nur aus Ländern importiert werden, die reich an Wald und zertifizierten Waldflächen (Waldzertifizierungssysteme FSC und PEFC) sind, und deren Derbholzpotenzial den inländischen Bedarf übersteigt. Dies wurde länderspezifisch mit dem Anteil zertifizierter Waldflächen und mit dem Selbstversorgungsgrad über 100 % abgeschätzt. Unter der Annahme, dass sich diese Indikatoren in Zukunft ähnlich entwickeln, kann vermutet werden, dass die bisherigen

Hauptlieferländer und Anrainerstaaten Polen, Tschechien und Frankreich auch in Zukunft relevante Lieferländer sein werden und durch den teilweise hohen Selbstversorgungsgrad eine Steigerung des Imports bieten könnten. Die mit höheren Transportwegen verbundenen baltischen Staaten Estland und Lettland haben aktuell einen sehr hohen Selbstversorgungsgrad und zeigen ebenfalls ein mögliches Potenzial für Holzimporte auf. Diesen steht jedoch gegenüber, dass vor allem Finnland und Schweden Haupthandelspartner sind und Deutschland für den Absatz aktuell eine untergeordnete Rolle einnimmt. Eine Einschätzung der Entwicklung der Handelsbeziehung zu Deutschland ist bei alleiniger Berücksichtigung der Holzwirtschaft nicht möglich. Eine abschließende Beurteilung potenzieller künftiger Lieferländer kann nicht getroffen werden. Hierfür wären länderspezifische Informationen und Statistiken über die Entwicklung des länderspezifischen Eigenbedarfs sowie die Holzproduktion und die Anteile zertifizierter Hölzer von für den Holzbau relevanten Holzarten notwendig. Für Importe wesentliche Indikatoren für die Lieferländer sind ein hoher Selbstversorgungsgrad, möglichst kurze Transportwege (Anrainerstaaten) sowie Waldzertifizierungssysteme.

Konkurrenz zu anderen stofflichen Nutzungsarten und zur energetischen Nutzung sowie Potenzial der Kaskadennutzung zur Minderung dieser Konkurrenz (AP 1.5)

Konkurrenz von Holz als Baustoff kann innerhalb der stofflichen und energetischen Verwertung entstehen. Für die stoffliche Verwendung kann bei einer Erhöhung der Holzbauquote eine Konkurrenz zum Möbelbau entstehen, da beide Sektoren ähnliche Holzeigenschaften und Qualitätsanforderungen benötigen sowie ähnliche Halbwaren verwenden. Würden in Zukunft die Laubholzarten Buche und Eiche/Roteiche eine intensivere Nutzung als Baustoff erfahren, so kann sich tendenziell diese Konkurrenz verstärken. Hauptsächlich Konkurrenz zum Holzbau besteht derzeit, und vermutlich auch in Zukunft, hauptsächlich zur energetischen Nutzung. Seit ca. 2009 zeigt die energetische Nutzung einen vergleichbaren Anteil wie die stoffliche Nutzung auf. Von dieser Konkurrenz betroffen sind verschiedene Holzsortimente wie hochwertiges Frisch- und Derbholz, Sägenebenprodukte aber auch Altholz. Die Ursache für diese Entwicklung liegt unter anderem im Erneuerbare Energiegesetz, im Energie-Wärmegesetz, in Marktanzreizprogrammen im Wärmebereich sowie in einer Marktreaktion auf steigende Preise fossiler Energieträger. Die Stärke der Konkurrenz lässt sich nur schwer abschätzen. Notwendig wären detaillierte Statistiken über Rohstoffe, Halbwaren und produzierte Fertigwaren sowie über den intersektoralen Gütertausch von Holz. Damit ließe sich unter anderem ein direkter Zusammenhang zwischen den Stufen der Wertschöpfungskette und der letztendlichen Verwendung ableiten.

Die Konkurrenz um Holz kann durch eine generelle Senkung des Ressourcenverbrauchs verringert werden. Für eine Steigerung der Holzbauquote und die Gewinnung des notwendigen Holzes ist ebenfalls eine verstärkte Kaskadennutzung eine Handlungsoption. Hier werden im Sinne des ressourceneffizienten Wirtschaftens Holz und die daraus hergestellten Produkte so lange wie möglich im Wirtschaftssystem genutzt. Das Potenzial für die Anwendung von Kaskaden und die Reduktion der Konkurrenz werden derzeit jedoch zu wenig ausgeschöpft. Ursachen liegen unter anderem in einer unzureichenden Getrenntsammlung von Altholz im Sinne der Menge und Qualitätsanforderung, fehlenden Umsetzungskonzepten und bestehenden gesetzlichen Rahmenbedingungen.

Auf politischer Ebene könnte die Konkurrenz unter anderem gelockert werden durch eine Unterbindung der einseitigen Förderung der energetischen Verwertung. Die Steigerung der Menge von Altholz unterschiedlicher Qualitätsanforderungen durch Getrenntsammlung wurde unter anderem in die Novellierung der Gewerbeabfallordnung aufgenommen. Auch für die Novelle der Altholzverordnung werden verschiedene Aspekte diskutiert, die in einer effizienteren Kaskadennutzung resultieren könnten. Dazu zählen unter anderem die gleichwertige Betrachtung von stofflicher und energetischer Nutzung sowie die Getrenntsammlungspflicht. Weitere Maßnah-

men wären zum Beispiel die Nutzung von Altholz der Kategorie AI nur zur stofflichen Verwertung, eine konsequente Sortierung des Abfalls am Ort des Anfalls (Quellsortierung), Kontrolle der Getrennthaltungspflicht sowie ein Entgegenwirken der wirtschaftlichen Unzumutbarkeit von stofflicher Verwertung durch Einführen einer Recyclingquote. Unterstützend wirkt hier die stetige Weiterentwicklung technologischer Verfahren für eine Sortierung. Damit die Kaskadennutzung in einer geringen Umweltwirkung resultiert, sind zusätzlich die Verwendung von Frischholz sowie die Erarbeitung von Nutzungs- und Verarbeitungskonzepten relevant. Die Verwendung von Frischholz für die stoffliche Verwertung zeigt deutlich geringere Umweltwirkung. Bei der Produktion von Holzwerkstoffen (z. B. Spanplatten) zeigt sich, dass durch Kaskadennutzung vor allem die Verwendung von Altholz statt Frischholz am Anfang der Produktionskette hohes Potenzial für Ressourceneffizienz und geringere Umweltwirkung hat. Um eine geringere Umweltauswirkung einer stofflichen Mehrfachnutzung gegenüber der energetischen Nutzung beizubehalten oder auszubauen, ist es notwendig für die Nutzungs- und Verarbeitungskonzepte effizientere Verbrennungsprozesse aber auch eine optimierte Logistik, Holzverarbeitung und Holzaufbereitung sowie eine Optimierung der Materialverluste zu erarbeiten. Die Entwicklung von Kaskadenkonzepten sollte unter Einbezug aller Akteure entlang der Wertschöpfungskette erfolgen. Zu beachten ist, dass für eine verlagerte Nutzung von Altholz für stoffliche statt energetische Nutzung zwingend berücksichtigt werden muss, dass durch fehlendes Altholz nicht das qualitativ hochwertige Frischholz für energetische Zwecke genutzt wird.

Flächeninanspruchnahme und Auswirkungen bei Steigerung der Holzbaurate (AP 1.6)

Betrachtet man die Annahme, dass eine Steigerung der Holzbauquote nicht mit einem Import von Hölzern gedeckt wird sondern mit einer Erhöhung der forstwirtschaftlichen Flächen im Inland zu decken ist, kann eine kurzfristige Umnutzung von Flächen nicht unterstützt werden. Umtriebszeiten von Bäumen betragen Jahrzehnte. Daher muss für forstwirtschaftliche Flächen im langfristigen Zeitrahmen gedacht werden. Aktuell bestehen zudem kaum Flächen für eine zusätzliche forstwirtschaftliche Nutzung. Es gibt bereits jetzt konkurrierende Nutzungsarten um Flächenanteile mit ökonomischen und ökologischen Interessenkonflikten in den Bereichen Vegetation, Siedlung, Verkehr und Gewässer. Eine Umnutzung von bestehenden Flächen ist daher als nicht erwünscht bzw. unrealistisch einzuschätzen. Soll eine Steigerung der Holzbauquote rein durch forstwirtschaftliche Flächen im Inland ermöglicht werden, wäre vermutlich nur eine begrenzte Steigerung der Holzbauquote möglich.

Eine generelle Aussage über die Auswirkungen der forstwirtschaftlichen Flächeninanspruchnahme durch eine gesteigerte Holzbauquote kann nicht getroffen werden. Vor allem Flächenbedarf und Art der Bewirtschaftung (intensiv, extensiv, Monokultur, ökologisch) und Beschaffung (konventionell oder nachhaltig) sind von zentraler Bedeutung für die resultierenden Aus- und Wechselwirkungen. Weiterhin müssen zukünftige Entwicklungen (z. B. in den Bereichen Demographie, Klima, Umwelt, planetare Grenzen, Biodiversität, Politik und Wirtschaft) berücksichtigt werden. Entscheidend bei der Erhöhung von Flächenanteilen sowie der Umnutzung von Flächen ist es, die Zielsetzungen der Nachhaltigkeitsstrategie sowie der Biodiversitätsstrategie konsequent umzusetzen.

Implikationen aus Waldnutzung (AP 1.7)

Wald- und Holznutzung tragen auf unterschiedliche Weise zum Klimaschutz bei. Zum einen binden Bäume Kohlendioxid. Der Wald nimmt bei nachhaltiger Holznutzung (d. h. Holznutzung ist geringer als Zuwachs) die Funktion einer CO₂-Senke ein. Zum anderen speichern Holzprodukte CO₂ bis zur energetischen Nutzung oder dem biologischen Abbau des Materials. Bauen mit Holz auf den Ebenen Konstruktion und Ausbau hat durch die lange Lebensdauer von Gebäuden ein hohes Potenzial CO₂ einzusparen. Essenzielle Differenzen in den Treibhausgasemissionen kön-

nen durch eine Substitution von mineralischen Rohstoffen durch Holz entstehen. Ganzheitliche Betrachtungen von CO₂-Einsparungseffekten haben gezeigt, dass eine nachhaltige Produktion und Nutzung von Holz zu einer Optimierung der CO₂-Bilanz zu führen scheint. Wald- und Holzprodukte aus nachhaltiger Forstwirtschaft beinhalten demnach ein bedeutendes Potenzial für die Speicherung von CO₂ und die Reduktion der Treibhausgasemissionen. Diese Auswirkungen haben eine wesentliche Bedeutung für die Erreichung der Klimaziele.

Vergleichende Ökobilanzen von Massiv- und Holzhäusern (AP 2)

Im Arbeitspaket 2 wurde ein Review vergleichender Ökobilanzen von Massiv- und Holzhäusern aus wissenschaftlichen Journalen und Berichten von Instituten und Universitäten durchgeführt. Im Rahmen einer Stichwortsuche sind dabei 25 Studien erfasst worden, die Auswertungen zu den Umweltindikatoren Primärenergie und Treibhauspotenzial in einer Gegenüberstellung der beiden Bauweisen für vollständige Gebäude mit allen Konstruktionsbauteilen bei einer näherungsweise einheitlichen funktionellen Äquivalenz enthalten.

Für die beiden Ökobilanzindikatoren Primärenergiebedarf (gesamt und nicht erneuerbar) und Treibhauspotenzial zeigt sich, dass in allen betrachteten Studien, ausgenommen einer Studienreihe Graubner et al. (2008 und 2013) und Pohl (2017), grundsätzlich die Holzbauweise – unabhängig von den gewählten Baustoffen für die Massivbauweise und Konstruktionsart innerhalb der Holzbauweise – geringere Umweltauswirkungen vorweisen kann. Dies gilt bei der Betrachtung der Systemgrenze Herstellung (Modul A), der Systemgrenze Herstellung bis Entsorgung (Module A bis C) und Cradle-to-Cradle (Module A bis D).

Die Varianz der Abweichung der beiden Bauweisen in den Umweltindikatoren ist zwischen den Studien jedoch hoch, da in den Studien unterschiedliche Randbedingungen verwendet wurden, die maßgeblich eine Ökobilanz beeinflussen können. Dies führt vor allem zu einer hohen Varianz in der Höhe des angegebenen Substitutionspotenzials des Baustoffs Holz.

Daher besteht in vielen Bereichen weiterer Forschungsbedarf für die Erstellung von vergleichenden Ökobilanzen, die eine Sensitivitätsanalyse unterschiedlicher Parameter betreiben. Dies gilt vor allem für die in einem starken wissenschaftlichen Diskurs befindliche Berücksichtigung des Modul D (Gutschriften), der Untersuchung weiterer Gebäudenutzungstypen und der detaillierteren Definition der Randbedingungen für einen Vergleich der Bauweisen.

Für einen transparenten, „fairen“ Vergleich ist eine einheitliche Anwendung von Standards in einer Ökobilanz erforderlich. Die unterschiedlichen Substitutionspotenziale von Holz entstehen vor allem durch unterschiedliche Betrachtungszeiträume in Kombination mit der Bauteillebensdauer, der unterschiedlichen Methodik in der Bilanzierung der Lebenszyklusphasen, den unterschiedlichen betrachteten Modulen der Lebenszyklusphasen und in nicht konsequenter Definition der funktionellen Äquivalenz der zu vergleichenden Ökobilanzmodelle mit den beiden Bauweisen.

Sensitivitätsanalyse

Studienübergreifend wurde ausgewertet, wie die Holzbauweise relativ zur Massivbauweise je Studie und betrachtetem Umweltindikator abschneidet. Die Relevanz einzelner Einflussgrößen, Lebenszyklusphasen und Baukonstruktionen wurde in den durchgeführten Sensitivitätsanalysen der Studien verdeutlicht. Dabei ist aufgefallen, dass sich die Autoren im Rahmen der Erstellung von vergleichenden Ökobilanzen überwiegend auf Wohngebäude (Ein- und Mehrfamilienhäuser) beschränken, jedoch ist der Anteil fertiggestellter Gebäude in Holzbauweise im Nichtwohnungsbau (17,3 %) ähnlich hoch wie der Anteil bei EFH (18,8 %). Zwischen 2002 und 2017 ist der Fertigstellungsanteil bei den EFH um 5,8 % gestiegen und bei den NWG um 3,2 %. Dies

verdeutlicht den Bedarf an bzw. das Potenzial von weiteren Ökobilanz-Studien mit dem speziellen Schwerpunkt auf weiteren Gebäudenutzungstypen.

Die funktionelle Äquivalenz wird u. a. durch einen identischen Energiestandard bzw. U-Wert der Bauteile, Energiebedarf in der Nutzungsphase, Brandschutzanforderungen, Schallschutzanforderungen, Gebäudeabmessungen und -typ definiert. Der Detailgrad der Beschreibung dieser funktionellen Äquivalenz variiert in den Studien jedoch. In den meisten Fällen dient ein reales Gebäude in einer bestimmten Bauweise als Grundlage für die Ökobilanz. In einer fiktiven Variantenbetrachtung wird die Baukonstruktion gegen eine abweichende Bauweise ausgetauscht.

Bei einem Vergleich ist auch der Anteil der Holzmasse in einem Holzgebäude entscheidend. Je höher der Anteil der mineralischen Baustoffe in einem Holzgebäude, umso geringer ist dementsprechend das Substitutionspotenzial durch den Baustoff Holz. Daher verzichten einige Studien bewusst z. B. auf die Modellierung von Gebäuden mit Kellern. Der Holzanteil der untersuchten Gebäude in Holzbauweise macht grundsätzlich weniger als 10 % aus. Dies ist von Bedeutung, da bei dem Vergleich der Bauweisen das komplette Gebäude in der Regel bestehend aus allen Konstruktionsbauteilen gegenüberzustellen ist, wohingegen ein Vergleich auf Produkt- oder Bauteilebene keine abschließende Aussage über den Vergleich der beiden Bauweisen Holz- und Massivbau geben kann.

Der Einfluss unterschiedlicher Holzkonstruktionsweisen auf die Umweltindikatoren liegt bei einem Vergleich der Bauweisen, beispielsweise für den Vergleich der Holzrahmen- mit der Holzmassivbauweise für das Treibhauspotenzial, bei unter 10 %. Für unterschiedliche Baustoffe innerhalb der Massivbauweise zeigt sich im Vergleich zu den Holzbauweisen ein ähnlich hoher maximaler Unterschied. Die Wahl des mineralischen Baustoffs hat einen maximalen Einfluss von ca. 10 %, wobei Mauerwerksbaustoffe wie Ziegel grundsätzlich besser abschneiden als eine Porenbeton- oder Stahlbetonbauweise. Der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung für Stahlbeton ist im Vergleich zum herkömmlichen Beton insbesondere in den Aspekten Landverbrauch für Kiesabbau und Deponierung von Abbruchmaterial von Vorteil. Ursache für den geringeren Landverbrauch liegt in der Schonung des Deponieraumes. Im Hinblick auf weitere Umweltbelastungen sind die Einflüsse der Verbrennung fossiler Energieträger und die Zementherstellung von entscheidender Bedeutung, vor allem ersichtlich in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial. Die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung trägt hierbei nur einen geringen Anteil.

Lebenszyklusphasen

Bei der Betrachtung der Anteile der Lebenszyklusphasen macht der Energieverbrauch in der Nutzungsphase abhängig von den gewählten Randbedingungen der Ökobilanz, Gebäude und Systemgrenzen in den untersuchten Ökobilanzen zwischen 48 % und 79 % des Primärenergiebedarfs gesamt aus. An zweiter Stelle liegt die Herstellungsphase (Module A1 bis A3), wohingegen die Bauphase (Module A4 bis A5) und die Entsorgungsphase (Module C3 und C4) vergleichsweise geringe Anteile aufweisen. Ein ähnliches Verhältnis gilt für den Umweltindikator Treibhauspotenzial.

Bei Betrachtung des Anteils der Herstellungs- gegenüber der Entsorgungsphase zeigt sich die Auswirkung der unterschiedlichen Bilanzierungsweise des Baustoffs Holz. Holz besteht zu ungefähr 50 % aus Kohlenstoff. Dies kann bei der Herstellung einbezogen werden, muss aber dann, um die Input- und Outputströme ausgeglichen zu halten, in der Entsorgungsphase wieder als Emission in die Atmosphäre ausgewiesen werden. Nach der aktuellen Normung geht die Kohlenstoffspeicherung nicht mit einem negativen Wert in das Modul A Herstellung ein, sondern die Entleerung des Kohlenstoffspeichers aus Modul C ist bereits in Modul A berücksichtigt. Die unterschiedliche Methodik in der Bilanzierung des Baustoffs Holz führt dazu, dass sich bei der alleinigen Betrachtung der Herstellungsphase in Studienvergleichen große Unterschiede ergeben

können. Die Ergebnisse müssen deshalb immer in Zusammenhang mit den Rahmenbedingungen betrachtet werden.

Für ein Gebäude, das die Anforderungen der EnEV 2014 erfüllt, wird in der Regel davon ausgegangen, dass die Konstruktion 30 % der gesamten Umweltauswirkungen über den Gebäudelebenszyklus ausmacht und somit der Großteil in der Lebenszyklusphase Nutzung im Energieverbrauch liegt. In einer Studie wurde bei einem 15 kWh-Energieniveau Gebäude ein Anteil der Konstruktion im Bereich von 70 % festgestellt. Dies verdeutlicht, dass künftig bei noch höheren Energiestandards Verbesserungen der Ökobilanz vor allem durch die Bauweisen erzielt werden können, die materialeffizient und mit geringeren Umweltbelastungen umgesetzt werden.

Die Transportdistanz der Baustoffe wirkt sich bei einer Erhöhung negativ sowohl auf den Primärenergieverbrauch als auch auf die CO₂-Bilanz aus. Das gilt für die Holz- und die Zementbauweise, wobei sich eine Erhöhung bei der Massivbauweise mit Zement deutlicher auswirkt, insbesondere aufgrund des Materialgewichts. Die festgelegten Transportdistanzen variieren in den verschiedenen Studien stark. Aus den Studien lässt sich ableiten, dass in Deutschland und in der Schweiz vor allem Holz aus dem Inland für den Holzbau verwendet wird und damit die Distanzen eher gering ausfallen. In der überwiegenden Anzahl der Studien hat der Transport im Vergleich zu den anderen Lebenszyklusphasen unabhängig von der Transportdistanz jedoch einen wenig relevanten Anteil in den Umweltauswirkungen. Weiter kann angeführt werden, dass sich in der vierten Studie im direkten Vergleich der prozentuale Anteil an den Transportemissionen mit 14 % beim Betonbau nur geringfügig von denen des Holzbaus, 16 %, unterscheidet.

Der Lebenszyklusphasenabschnitt Modul D (Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze) behandelt Umweltauswirkungen und Gutschriften, die sich aus dem Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- und Recyclingpotenzial ergeben. Nach DIN EN ISO 14044 sind diese im Rahmen der Erstellung einer Ökobilanz lediglich informativ auszuweisen. Für die einzelnen Baustoffgruppen und die Betrachtung des Gesamtsystems Gebäude können sich große Unterschiede hinsichtlich des Potenzials der Gutschriften ergeben. Daher hat die Addition des Moduls D auf das Gesamtergebnis der Umweltauswirkungen über alle Lebenszyklusphasen, wie es in einigen Studien (die keinen Normbezug aufweisen) durchgeführt wurde, einen sehr hohen Einfluss.

Bei der Berücksichtigung einer Nutzung des Energieinhaltes von Holz zur Substitution von fossilen Energieträgern bei der Verbrennung oder der Berücksichtigung des Aspektes, dass unter den Rahmenbedingungen großer, nachhaltig bewirtschafteter Waldflächen, wie sie in Europa bestehen, jeder genutzte Stamm Platz für nachwachsende Bäume erzeugt und den Kohlenstoffspeicher vermehrt, ergeben sich bei einer nicht normkonformen Bilanzierung der Umweltauswirkungen über die Module A-D im Vergleich zur Massivbauweise wesentlich geringere Umweltauswirkungen. In dem Umgang mit dem Modul D besteht daher noch weiterer Forschungsbedarf zum Umgang mit diesem Aspekt.

Der Vergleich der angesetzten Rahmenbedingungen bei der Studie, in der die Massivbauweise günstiger abschneidet, gibt Aufschluss darüber, welche Parameter zu abweichenden Ergebnissen führen. Nach den Ergebnissen von Graubner et al. (2008 und 2013) ist bei der Betrachtung des gesamten Lebenszyklus die Massivbauweise in den Umweltindikatoren mindestens gleichwertig mit der Holzbauweise. Zu einzelnen Kriterien ist die Massivbauweise sogar günstiger. Ursache liegt vor allem in der Kombination der Betrachtungsdauer (50 und 80 Jahre) mit einem höheren Austauschzyklus von Holzbauteilen im Vergleich zur Massivbauweise.

Weitere Ökobilanzindikatoren

Darüber hinaus wurden in einer Vielzahl von Studien weitere Parameter identifiziert, die eine Ökobilanz maßgeblich beeinflussen. Dazu wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um zu

klären, welche Aspekte bei einem Vergleich der Bauweisen besonders wichtig sind. Dazu zählen vor allem die Wahl des Betrachtungszeitraumes in Kombination mit der angesetzten Lebensdauer von Bauteilen, der Anteil der Holzbaustoffe bei einem Holzgebäude, die verwendete Datenbank, der Gebäudetyp, der Gebäudestandort und die berücksichtigten Lebenszyklusphasen.

Emissionen von Bauteilen in den Innenraum sind nicht Bestandteil der betrachteten vergleichenden Ökobilanzen. Daher wird dieser Aspekt nachfolgend lediglich angesprochen. Die Frage, ob beispielweise eine Bauweise mit erhöhten Emissionen in den Innenraum eines erhöhten Energieaufwands zur Erhöhung der Lüftungsrate bedarf, wird in den vergleichenden Ökobilanzen ebenfalls nicht betrachtet.

Häufige Formaldehydquellen im Holzbau waren früher und sind teilweise noch heute vor allem die Holzwerkstoffe. In der Vergangenheit wurden diese Werkstoffe oftmals mit formaldehydbasierten Klebstoffen verleimt, hingegen werden heutzutage nur noch formaldehydarme oder -freie Holzwerkstoffe eingesetzt. Lösemittellemissionen aus Baustoffen sind in der Holzbauweise z. B. natürliche, flüchtige Bestandteile wie Terpene aus Bast- und Rindenanteilen von OSB-Platten oder VOCs aus Naturharzen.

Im Vergleich zum Holzbau lässt sich über den Massivbau sagen, dass hierbei insbesondere Textilien, Bindemittel in Mineralfaserdämmungen, gelochte Akustikdecken aus Kunststoff und verschiedene Kleber eine Formaldehydquelle darstellen. Im Bereich Lösemittel emittieren vorwiegend Bodenbeläge oder Weichmacher von Kunststofftextilien flüchtige, organische Stoffe, die die Raumluft belasten. Aufgrund von sehr dichten Gebäudehüllen sowie einem niedrigen natürlichen Luftwechsel können in modernen Gebäuden immer noch sehr hohe Formaldehydkonzentrationen auftreten, weshalb bei der Errichtung eines Holz- oder Massivgebäudes ein passendes Lüftungskonzept anzuwenden ist. Denn für eine möglichst VOC-arme Raumluftkonzentration ist eine hohe Luftwechselrate anzustreben. Zuzüglich ist auf VOC-Freiheit bei den einzusetzenden Baustoffen und Materialien zu achten. Für eine hygienische und gesunde Raumluft im Holzbau sollten keine chemischen Holzschutzmittel und bioziden Beschichtungsstoffe in beheizten Innenräumen eingesetzt werden. Im Massivbau sind keine chemischen Holzschutzmittel vorhanden, aber kunststoffhaltige Putze und Farbanstriche können dafür die Raumluftthygiene beeinflussen. In der Oberflächenmaterialisierung könnte daher der Massivbau einen Vorteil gegenüber dem Holzbau besitzen.

Fazit

Im Zentrum des vorliegenden Fachgutachtens „Potenziale von Bauen mit Holz“ standen die beiden Themenkomplexe: „Verfügbarkeit von Konstruktionsholz als Baustoff“ sowie „Vergleichende Ökobilanzen von Holz- und Massivhäusern“, zu denen vorgegebene Forschungsfragen unter Berücksichtigung von wissenschaftlichen Quellen umfassend bearbeitet wurden.

Die Aufgabe zum Thema „vergleichende Ökobilanzen von Holz- und Massivhäusern“ bestand darin, aus wissenschaftlichen Journalen die Umweltauswirkungen der beiden Bauweisen zu untersuchen. Als Leitindikatoren für die Bewertung dienten Primärenergie (gesamt und nicht erneuerbar) und Treibhauspotenzial.

In der Auswertung der Bauphase sollte darüber hinaus ermittelt werden, welchen Einfluss die Transportentfernungen der Baumaterialien (national gewonnene und importierte Hölzer oder mineralische Baustoffe) auf die Gesamtbilanz haben.

Für die gewählten Leitindikatoren zeigt sich, dass in allen betrachteten Studien, ausgenommen einer Studienreihe, grundsätzlich die Holzbauweise – unabhängig von den gewählten Baustoffen

für die Massivbauweise und Konstruktionsart innerhalb der Holzbauweise – geringere Werte in den Leitindikatoren vorweisen kann. Dies gilt bei der Betrachtung der Systemgrenzen Herstellung (Modul A), Herstellung bis Entsorgung (Module A bis C) als auch bei Cradle-to-Cradle (Module A bis D). Wenn die Systemgrenze Modul A bis D verwendet wird, unterbietet die Holzbauweise die Massivbauweise am deutlichsten. Allerdings sind hier die Unterschiede zwischen den Studien am größten, da für das Modul D - Gutschriften bisher kein einheitliches Verständnis zur Bilanzierung und Datenbasis besteht, und gleichzeitig die Vorteile von Holz durch das Substitutionspotenzial bei der energetischen Verwertung und Kaskadennutzung an dieser Stelle potentiell hoch ist.

Zudem wurde festgestellt, dass die Transportaufwendungen in der Herstellungs- und Bauphase für die Baumaterialien nur einen geringen bzw. vernachlässigbaren Anteil auf die Leitindikatoren einer Ökobilanz besitzen.

Es konnte bei der Analyse der Publikationen jedoch eine hohe Varianz in der Abweichung der beiden Bauweisen in den Leitindikatoren zwischen den Studien festgestellt werden. Dies ist darin begründet, dass für die Bildung der Sachbilanz des Ökobilanzmodells unterschiedliche Randbedingungen verwendet wurden und Abweichungen in den abgebildeten Gebäudemodellen bestehen. Eine Sensitivitätsanalyse zeigt, dass die Anzahl der beeinflussenden Stellschrauben (z. B. Untergeschosse des zu vergleichende Gebäudemodells, gewählte Datenbasis für die Baustoffe) hoch ist.

In allen betrachteten Studien wurde grundsätzlich davon ausgegangen, dass der Gesamtkohlenstoffspeicher inkl. Boden des Waldes, aus dem das Bauholz stammt, nicht abnimmt. Ebenfalls wurde festgestellt, dass die publizierten Ökobilanzen als Vergleichsgrundlage größtenteils Einfamilienhäuser und vereinzelt Mehrfamilienhäuser nutzen. Hieraus lässt sich in vielen Bereichen weiterer Forschungsbedarf ableiten, dazu gehören:

- ▶ Untersuchung weiterer Gebäudenutzungstypen im Bereich Nichtwohngebäude wie Büro- und Laborgebäude, da der Anteil fertiggestellter Gebäude in Deutschland und die Steigerungsrate der Holzbauweise vergleichbar mit dem Wohnungsbau ist
- ▶ einheitliche Verwendung und Definition von Parametern für die Sachbilanz, insbesondere für die Bauteillebensdauer, den Betrachtungszeitraum (liegt in den Studien zwischen 30 und 80 Jahren) und die Gewährleistung der funktionellen Äquivalenz
- ▶ Schaffung einer ausreichenden Datenbasis und eines einheitlichen Verständnisses zur Bewertung von Modul D (Gutschriften): Substitutionspotenzial von fossilen Energieträgern und Kaskadennutzung bei Holz
- ▶ Einfluss der Bauweise auf den Betrieb (u. a. Nutzerverhalten, Emissionen in den Innenraum) von Gebäuden
- ▶ Berücksichtigung von weiteren Gegenüberstellungen, wie Auswirkung der Kaskadennutzung von Holz, weiteren Holzarten, Waldnutzungstypen und Importhölzern

An den Fragenkomplex zu den Umweltauswirkungen der Bauweisen schlossen die Fragestellungen zur Verfügbarkeit von Konstruktionshölzern als Baustoff an. Allen voran stand die Fragestellung, wie hoch das Potenzial an national verfügbaren Hölzern tatsächlich ist.

Durch Gegenüberstellung der Volumina der inländischen Derbhholzverwendung und des damit einhergehenden Waldholzeinsatzes des Jahres 2016 mit den jeweils verwertbaren Rohholzpo-

tenzialen nach Abzug des Totholzzielvorrats konnten für die drei Waldbehandlungsszenarien Aussagen abgeleitet werden, in welchem Umfang das nationale Rohholzpotenzial den nationalen Bedarf zukünftig zu decken vermag. Die Kernaussagen sind hierbei:

- ▶ Die Waldholznutzung des Jahres 2016 kann sowohl für Nadelholz als auch für Laubholz für die Periode bis 2052 aus den mittleren zukünftigen nationalen Rohholzpotenzialen (bei teilweise geringfügiger Substitution von Nadel- durch Laubholz) ohne Erhöhung des Imports gedeckt werden.
- ▶ Im Fall des Holzpräferenzszenarios übersteigt das verwertbare Potenzial sowohl für Nadel- als auch für Laubholz die Inlandsverwendung deutlich. Ein Import von Holz ist nicht erforderlich.
- ▶ Beim Basisszenario ist nur das Laubholzpotenzial ausreichend groß, um die Inlandsverwendung abzudecken. Allerdings würde eine geringfügige Substitution des fehlenden Nadelholzpotenzials durch Laubholz einen Verzicht auf Holzimporte ermöglichen.
- ▶ Beim Naturschutzszenario ist das Laubholzpotenzial ebenfalls groß genug, um die Inlandsverwendung abzudecken. Das zu niedrige Nadelholzpotenzial kann hierdurch jedoch nicht ausgeglichen werden. Es besteht Importbedarf.

Hieran schloss sich die Fragestellung an, welche Hölzer bei einer gesteigerten Holzbauquote zusätzlich aus welchen anderen Ländern importiert werden müssten und welche Qualitätsanforderungen an diese zu stellen wären.

Das theoretisch mögliche mittlere Steigerungspotenzial der Holzbauquote für die Periode 2013-2052 ohne Erhöhung der Holzimportmengen und bei konstanter Derbholznutzung aller anderen Wirtschaftszweige liegt je nach WEHAM-Waldhandlungsszenario zwischen 11 und 220 %. Um auch die möglichen Steigerungen des Holzverbrauchs in anderen Wirtschaftszweigen bei der Ermittlung des Steigerungspotenzials im Holzbau zu berücksichtigen, wurden die Forschungsergebnisse der WEHAM-Holzverwendungsszenarien im Vergleich zu den WEHAM-Waldbehandlungsszenarien ausgewertet. Es zeigte sich, dass hieraus aufgrund fehlender Daten jedoch nicht ableitbar war, in welchem Umfang Holz bei einer Steigerung der Holzbauquote zu importieren wäre. Hierfür wären weitere Untersuchungen erforderlich.

Deutschland ist mit einem aktuellen Außenhandelssaldo von ca. +7 % (Nadelholz ca. +11 %, Laubholz ca. -4 %) Nettoimporteur von Derbholz. Bei steigender Holzbauquote lässt sich vermuten, dass auch in Zukunft Holzimporte notwendig sind. Eine quantitative Aussage lässt sich innerhalb dieser Studie jedoch nicht treffen. Dafür bedarf es einer detaillierteren Analyse unter Berücksichtigung der Nachfrageentwicklung nach Derbholz aller Wirtschaftssektoren. Notwendig wären außerdem Statistiken mit Informationen der einzelnen EU-Länder zu Holzarten und ihrer Spezifizierung nach Laubholzarten und Nadelholzarten, deren Anteil zertifizierter Fläche sowie dem damit verbundenen Holzaußenhandel. Holzimporte unterliegen gesetzlichen Rahmenbedingungen und internationalen Vereinbarungen. Hinsichtlich der Qualitätsanforderungen an zu importierendes Holz gelten die im Beschaffungserlass für Holzprodukte des Bundes genannten Anforderungen als Mindestanspruch, wonach zu importierendes Holz aus zertifiziert nachhaltig bewirtschafteten Wäldern stammen muss. Weiterhin ist zu empfehlen, möglichst aus Anrainerstaaten zu importieren, um so die Umweltauswirkung bezüglich des Transportweges gering zu halten. Wichtig ist außerdem die Vermeidung ökologischer Verlagerungseffekte, indem die Lieferländer einen hohen Selbstversorgungsgrad aufweisen und über einen hohen Anteil zertifizierter Waldflächen verfügen. Unter der Annahme, dass sich diese Indikatoren in Zukunft

für die europäischen Staaten ähnlich entwickeln, wird vermutet, dass auch in Zukunft die Anrainerstaaen Polen, Tschechien und Frankreich relevante (Haupt-)lieferländer sein werden und durch den teilweise hohen Selbstversorgungsgrad eine Steigerung des Imports für Holzbau bieten könnten. Für eine detailliertere Analyse und konkretere Aussagen zum Holzimport müsste die Entwicklung der Nachfrage nach Holz aus allen Wirtschaftssektoren berücksichtigt werden. Es bedarf außerdem einer erweiterten Datenbasis in Form von Statistiken der EU-Länder zu Holzarten mit Spezifizierung nach Laubholzarten und Nadelholzarten, deren Anteil zertifizierter Fläche sowie dem damit verbundenen Holzaußenhandel.

Eine Steigerung der Holzbauquote ohne Importe sondern nur mit einer Erhöhung der forstwirtschaftlichen Flächen im Inland, wird als wenig realistisch eingeschätzt. Derzeit gibt es keine freien Flächen für zusätzliche forstwirtschaftliche Nutzung. Durch eine bestehende hohe Konkurrenz verschiedener Flächennutzungen wird eine Flächenumnutzung zu Gunsten der Forstwirtschaft für eine langfristigen Zeitrahmen als gering umsetzbar eingeschätzt. Umnutzungen zu Kurzumtriebsplantagen wären unzureichend, da deren Hölzer (v. a. Pappel und Weide) derzeit vorwiegend für energetische Nutzung verwendet werden. Inwieweit diese Hölzer in Zukunft vermehrt zu Konstruktionsholz verwertet und etabliert werden könnten und wie hoch das Potenzial von Kurzumtriebsplantagen für die Erhöhung der Holzmenge für Holzbau ist und damit in einer Verringerung der Holzimporte resultiert, bedarf weiterer Untersuchungen.

Für die Konkurrenz zu Holz als Baustoff ist vermutlich auch in Zukunft vor allem die Konkurrenz zur energetischen Nutzung relevant. Verringert werden kann diese Konkurrenz durch eine generelle Senkung des Ressourcenverbrauchs. Gemindert werden kann sie durch gesetzliche Rahmenbedingungen, die einer einseitigen Förderung der energetischen Nutzung entgegenwirken. Betreffend der stofflichen Nutzung könnte eine Konkurrenz zum Möbelbau entstehen, wenn vermehrt Laubholz (Baubuche, Eiche, Roteiche) für Holzbau zum Einsatz kommt. Kaskadennutzung ist ein interessanter Ansatz die Konkurrenzen zum Holzbau abzuschwächen und ressourceneffizient zu wirtschaften. Ihr Potenzial wird derzeit vor allem wegen mangelnder Quantität und Qualität an Altholz aber auch durch fehlende Prozesse nicht ausgeschöpft. Für eine Steigerung der Menge von Altholz unterschiedlicher Qualitätsanforderungen wurde eine konsequentere Getrenntsammlung unter anderem in der Novellierung der Gewerbeabfallordnung aufgenommen. Auch für die Novelle der Altholzverordnung werden verschiedene Aspekte diskutiert, die in einer effizienteren Kaskadennutzung resultieren könnten. Themen sind unter anderem die Getrenntsammlungspflicht sowie eine gleichwertige Betrachtung von stofflicher und energetischer Nutzung. Weitere Maßnahmen könnten zum Beispiel die Nutzung von qualitativ hochwertigem Altholz der Kategorie AI nur zur stofflichen Verwertung, eine konsequente Sortierung des Abfalls am Ort des Anfalls (Quellsortierung), Kontrolle der Getrennthaltungspflicht sowie ein Entgegenwirken der wirtschaftlichen Unzumutbarkeit von stofflicher Verwertung durch Einführen einer Recyclingquote sein. Unterstützend für die Getrenntsammlung wirkt hier die stetige Weiterentwicklung technologischer Verfahren für eine Sortierung. Im Sinne des nachhaltigen Wirtschaftens muss die Kaskadennutzung für die stoffliche Mehrfachnutzung in eine geringe Umweltwirkung resultieren und diese auch im Vergleich zur energetischen Nutzung beibehalten und im besten Fall ausbauen. Verschiedene Studien zeigen auf, dass es derzeit für die Kaskade an Nutzungs- und Verarbeitungskonzepten fehlt. Für deren Erarbeitung ist unter anderem die Entwicklung von effizienteren Verbrennungsprozessen notwendig aber auch eine optimierte Konzeptionierung von Logistik, Holzverarbeitung und Holzaufbereitung sowie eine Minimierung der Materialverluste. Für die Entwicklung der Kaskadenkonzepte ist es zu empfehlen, alle Akteure entlang der Wertschöpfungskette einzubeziehen. Der Umgang mit Frischholz ist ebenfalls wesentlich. Dessen Verwendung für die stoffliche Verwertung zeigt deutlich geringere Umweltwirkungen. So hat bei der Produktion von Holzwerkstoffen (z. B. Spanplatten) die Verwendung von Altholz statt Frischholz am Anfang der Produktionskette hohes Potenzial für Ressourceneff-

fizienz und für geringere Umweltwirkung. Zu beachten ist, dass für eine verlagerte Nutzung von Altholz für stoffliche statt energetische Nutzung zwingend berücksichtigt werden muss, dass durch fehlendes Altholz nicht das qualitativ hochwertige Frischholz für energetische Zwecke genutzt wird. Bei einer Verlagerung von Altholz für stoffliche statt energetische Nutzung muss zwingend darauf geachtet werden, dass das dadurch für die energetische Nutzung fehlende Altholz nicht durch qualitativ hochwertiges Frischholz substituiert wird.

Eine weitere Möglichkeit, die Holzbauquote zu steigern, ohne auf zusätzliche Importe oder Aufforstungen größerer Art angewiesen zu sein, besteht in der Substitution von derzeit für konstruktive Holzbauprodukte hauptsächlich eingesetztem Nadelholz durch Laubholz. Mit Ausnahme von reinem Vollholz, für welches gerade, lange, gut trocknungsg geeignete Stammanteile benötigt werden, und von Nagelplattenbindern wird ein Einsatz von Laubholz bei jeder Holzbauweise in naher oder fernerer Zukunft für gut möglich gehalten. Zur Zeit stehen einem verstärkten Laubholzeinsatz noch teilweise fehlende baurechtliche Regelungen (wie beispielsweise Normen oder Zulassungen), teilweise anzupassende Technologie (wie beispielsweise Verklebungen oder für die in der Regel größeren Stammdurchmesser nicht immer geeignete Sägeanlagen) sowie vor allem der höhere Preis und das niedrigere Angebot entgegen. Letztere sind einerseits durch das langsamere Wachstum begründet, nicht zuletzt jedoch auch durch die vorgenannten Punkte der rechtlichen Regelungen und der Technologieanpassungen, deren Kosten auf die Holzbau- bzw. Holzwerkstoffpreise aufgeschlagen werden. Für eine genauere Kostenuntersuchung besteht weiterer Forschungsbedarf, der sich auch auf mögliche Anreizbildungen für einen verstärkten Laubholzeinsatz ausdehnen könnte.

Grundsätzlich zeigt sich, dass zur übergeordneten Frage, wie hoch der ökologische Mehrwert der Holzbauweise in Deutschland insgesamt ist, wie sich dieser erhöhen lässt und wie sich die ökonomischen Randbedingungen darstellen, zunächst die einzelnen Teilaspekte eindeutiger zu klären und anschließend zu verknüpfen sind. Dazu gehört zusammengefasst vor allem:

- ▶ Ein einheitlicher Konsens bezüglich der Bewertung des Holzes am Ende seiner Lebensdauer bzw. der Kaskadennutzung innerhalb der Ökobilanz
- ▶ Aussagen zum Potenzial der Holzbausteigerungsrate bei unterschiedlichen Waldnutzungsvarianten und Auswirkungen auf den Flächenbedarf
- ▶ Analyse von Holzverwendung in verschiedenen Wirtschaftssektoren
- ▶ Potenziale alternativer Bauweisen im Neubaubereich
- ▶ Entwicklungspotenziale der Verwendungswege von Holz, insbesondere Konkurrenz zwischen energetischer und stofflicher Nutzung
- ▶ Integrale Sichtweise: Lebenszyklusbetrachtung unter Einbezug der Akteure entlang der Wertschöpfungskette
- ▶ Erweiterte statistische Datengrundlage in Bezug auf unterschiedliche Laub- und Nadelwaldholzarten sowie Information über zertifizierten Flächenanteil für Deutschland sowie mit dem Außenhandel den EU-Ländern

Erst dann kann sich der potenzielle Beitrag der Holzbauweise bei unterschiedlichen örtlichen, nutzungsspezifischen und baulichen Rahmenbedingungen zur Gesamtbilanz des Klima- und Umweltschutzes in Deutschland unter realistischen Szenarien bemessen lassen.

Summary

Wood qualities for timber constructions (AP 1.1)

Chapter 2 examined which timber qualities can be used for the various timber construction methods in building construction. To this end, the usable wood construction and wood-based materials were first described, then possible wood construction methods were explained and the wood products that could be used were presented, and finally the usable wood types and wood qualities were summarised. The focus was on the comparative investigation of softwood and hardwood as well as the possible use of hardwood.

It has been shown that the main timber construction products currently used are softwoods, and for which timber products and timber construction methods the use of hardwoods would be possible in the short or long term. In summary, it could be shown that a significant increase in the hardwood content would be possible for both timber construction and derived timber products if the corresponding manufacturing technologies were adapted and the legal basis created. In addition to the partially unregulated use, the higher costs and lower supply currently stand in the way of a higher use of hardwoods. In some cases, however, some typical hardwood properties are also a hindrance. In the case of solid woods, the partly significant curvature and the associated limited length of straight components are seen as limitations. With the remaining wood building and wood materials also the time- and cost-intensive drying, which can lead to larger source and shrinkage coefficients partially (which with drying to cross section distortions or twists), the bonding (choice of suitable adhesives, adhesive thickness, -order etc.) and wedge-joint as well as the manufacturing technology itself are to be examined still more near. There is a need for further research in this area. In addition, the more complex assembly (due to higher density and additional pre-drilling for pin-shaped fasteners) must be taken into account.

Nationally available woods (AP 1.2)

Chapter 3 dealt with the question of how large the potential of the nationally available wood is and how the regional distribution within Germany presents itself. As a starting point, the current statistically recorded timber felling in Germany in 2017 was evaluated according to timber species, timber types and federal states. The shortcomings of the statistical recording, which lead to an underestimation especially of the energy wood portion and an underestimation of the felling of the year 2017 of approx. 25 %, were also dealt with. In a second step, the development of the timber stock and the raw timber potential in Germany up to the year 2052 and the WEHAM forest treatment models developed to calculate these data were presented. For the values on the raw wood potential, reference was made to the different data in various sources. In addition, the regional distribution was used to show that approx. 40 % of the German raw wood potential is forecast in the federal states of Bavaria and Baden-Württemberg.

By comparing the volumes of domestic *derbholz* use and the associated use of forest wood in 2016 with the respective usable raw wood potentials of the three forest treatment scenarios, it was possible to derive statements on the extent to which the national raw wood potential will be able to cover national demand in the future. For this purpose, the usable raw wood potential after deduction of the dead wood target stock was considered. Accordingly, the forest wood utilisation for 2016 can be covered from the average future raw wood potentials both for coniferous wood and for hardwood for the period up to 2052. In one scenario a minor substitution of softwood by hardwood is required. An increase in imports would not be necessary if the 2016 utilisation level were maintained. In all three forest treatment scenarios, a complete import renunciation would even be possible in the case of hardwoods, and in the case of softwoods only in the wood preference scenario.

When considering domestic use, the scenarios showed different results. In the case of the wood preference scenario, the usable potential for both coniferous and hardwoods clearly exceeds domestic use. Import of wood is not required. In the baseline and nature conservation scenarios, only the hardwood potential is large enough to cover domestic use. The coniferous wood potential is too low to be able to dispense with the import of wood for a given constant use. In the base scenario, however, the total wood potential is almost large enough to cover domestic use. A slight substitution of the missing coniferous potential by hardwood would therefore make it possible to dispense with wood imports. In the nature conservation preference scenario, however, the hardwood potential is not sufficient to compensate for the too low coniferous wood potential. Here is a need for imports, but in total in a somewhat lower order of magnitude than shown in the timber balance for 2016.

Import of timber with increase in timber construction quota (AP 1.3 und 1.4)

In Chapter 4 it was examined to what extent timber is additionally imported from other countries, also from non-European countries, and what quality requirements this would have to meet if the timber construction quota were to increase.

To this end, it was first explained why an increase in the timber construction quota is understood to mean an increase in the proportion of wood used in all construction work. Subsequently, the results from Chapter 3 were used to calculate the mean increase potential of forest timber use and the theoretical mean increase potential of the timber construction quota for the period 2013-2052 without increasing timber imports. The latter assumes a constant solid wood utilisation of all other wood-using branches of industry compared to the reference year and amounts to 25 % for the base scenario, 220 % for the wood preference scenario and 11 % for the nature conservation preference scenario.

In order to also take into account possible increases in wood consumption in other branches of the economy when determining the growth potential in timber construction, the research results of the WEHAM wood use scenarios were evaluated in comparison to the forest treatment scenarios. It was shown that it is not possible to derive from this which timber construction increase rate could be realised with the available solid wood potential for each forest treatment scenario without importing coniferous wood. Accordingly, it cannot be deduced from the research results to what extent timber would have to be imported if the timber construction quota had been increased. For this, further investigations would be necessary.

Under the assumption that an increase in the proportion of timber construction requires even more timber imports, various quality requirements must be included. Germany is based on existing EU and international agreements that prevent the destruction of tropical forests, the over-exploitation of resources and the marketing of illegal timber. Negative ecological effects must also be reduced, according to which transport routes for timber imports should be kept to a minimum, and as a result, imports should take place as far as possible from neighbouring states. Furthermore, in order to avoid ecological displacement effects, timber should only be imported from countries rich in forests and certified forest areas (forest certification systems FSC and PEFC) and whose timber potential exceeds domestic demand. This was estimated on a country-specific basis with the proportion of certified forest areas and the degree of self-sufficiency above 100 %. Assuming that these indicators will develop similarly in the future, it can be assumed that the previous main supplier countries and neighbouring states Poland, the Czech Republic and France will continue to be relevant supplier countries in the future and that the partially high degree of self-sufficiency could offer an increase in imports. The Baltic states Estonia and Latvia, which are connected with higher transport routes, currently have a very high degree of self-sufficiency and also show a potential for wood imports. On the other hand, Finland and

Sweden are the main trading partners and Germany currently plays a subordinate role in sales. An assessment of the development of trade relations with Germany is not possible if only the timber industry is taken into account. A final assessment of potential future supplier countries cannot be made. This would require country-specific information and statistics on the development of country-specific own requirements as well as on timber production and the proportion of certified timber of species relevant to timber construction. Important indicators for importing countries are a high degree of self-sufficiency, short transport routes (neighbouring states) and forest certification systems.

Competition with other types of material use and energetic use and potential of cascade use to reduce this competition (AP 1.5)

Competition from wood as a building material can arise within the material and energy recovery process. For material use, an increase in the wood construction quota can lead to competition with furniture construction, as both sectors require similar wood properties and quality requirements and use similar semi-finished products. If in future the hardwood species beech and oak/red oak were to be used more intensively as building materials, this competition could tend to intensify. At present, and probably also in the future, the main competition to timber construction is mainly for energy use. Since around 2009, energy use has accounted for a comparable share to material use. This competition affects various types of wood such as high-quality fresh and coarse wood, sawmill by-products and waste wood. The reasons for this development include the Renewable Energy Act, the Energy Heat Act, market incentive programmes in the heating sector and a market reaction to rising prices for fossil fuels. The strength of the competition is difficult to assess. Detailed statistics on raw materials, semi-finished and finished goods as well as on the intersectoral exchange of goods for wood would be necessary. Among other things, this would allow a direct correlation to be deduced between the stages of the value chain and the final use.

Competition for wood can be reduced by a general reduction in resource consumption. For an increase in the timber construction quota and the extraction of the necessary timber, an increased cascade use is also an option for action. In the sense of resource-efficient management, wood and the products made from it are used in the economic system for as long as possible. However, the potential for the use of cascades and the reduction of competition is currently not being fully exploited enough. Causes include insufficient separate collection of waste wood in terms of quantity and quality requirements, lack of implementation concepts and existing legal framework conditions.

At the political level, competition could be loosened by, among other things, unifying the one-sided promotion of energy recovery. The increase in the quantity of waste wood of different quality requirements through separate collection was included in the amendment to the Commercial Waste Ordinance. Various aspects that could result in more efficient cascade use are also being discussed for the amendment to the Waste Wood Ordinance. These include, among other things, equal consideration of material and energy use and the obligation to collect waste separately. Further measures would include, for example, the use of category A1 waste wood only for material recycling, consistent sorting of waste at the point of generation (source sorting), monitoring of the obligation to separate waste and counteracting the economic unacceptability of material recycling by introducing a recycling quota. This is supported by the continuous further development of technological processes for sorting. To ensure that cascade utilisation results in a low environmental impact, the use of fresh wood and the development of utilisation and processing concepts are also relevant. The use of fresh wood for material recycling has a significantly lower environmental impact. In the production of wood-based materials (e.g. chipboard), it can be seen that the cascade use of waste wood instead of fresh wood at the beginning of the

production chain has a high potential for resource efficiency and lower environmental impact. In order to maintain or extend a lower environmental impact of material multiple use compared to energy use, it is necessary to develop more efficient combustion processes for the utilisation and processing concepts, but also optimised logistics, wood processing and wood preparation as well as optimisation of material losses. The development of cascade concepts should involve all actors along the value chain. It should be noted that, in order to shift the use of waste wood from energy to material use, it must be taken into account that the lack of waste wood means that high-quality fresh wood is not used for energy purposes.

Land use and effects of increasing timber construction rates (AP 1.6)

If one considers the assumption that an increase in the timber construction quota is not covered by an import of timber but is to be covered by an increase in domestic forestry land, a short-term conversion of land cannot be supported. Tree rotation times are decades. For this reason, forestry areas must be considered in the long-term time frame. At present, there is hardly any land available for additional forestry use. There are already competing types of use for areas with economic and ecological conflicts of interest in the areas of vegetation, settlement, transport and water. A conversion of existing areas is therefore to be assessed as undesirable or unrealistic. If an increase in the timber construction quota is to be made possible purely by domestic forestry land, only a limited increase in the timber construction quota would presumably be possible.

It is not possible to make a general statement on the effects of the forestry land claim due to an increased timber construction quota. Above all, the area required and the type of farming (intensive, extensive, monoculture, ecological) and procurement (conventional or sustainable) are of central importance for the resulting effects and interactions. Furthermore, future developments (e.g. in the fields of demography, climate, environment, planetary borders, biodiversity, politics and economy) must be taken into account. When increasing the proportion of land and converting land, it is crucial to consistently implement the objectives of the sustainability strategy and the biodiversity strategy.

Implications from forest use (AP 1.7)

Forest and wood use contribute to climate protection in different ways. On the one hand, trees are carbon dioxide. When wood is used sustainably (i.e. wood use is less than growth), the forest assumes the function of a CO₂ sink. On the other hand, wood products store CO₂ until the material is used for energy or biodegraded. Building with wood on the levels of construction and finishing has a high potential to save CO₂ due to the long service life of buildings. Essential differences in greenhouse gas emissions can result from the substitution of wood for mineral raw materials. Holistic considerations of CO₂ saving effects have shown that a sustainable production and use of wood seems to lead to an optimisation of the CO₂ balance. Forest and wood products from sustainable forestry therefore have a significant potential for storing CO₂ and reducing greenhouse gas emissions. These impacts have a significant impact on the achievement of climate goals.

Comparative Life Cycle Assessments of Solid and Wooden Houses (AP 2)

In work package 2, a review of comparative life cycle assessments of solid and timber houses from scientific journals and reports from institutes and universities was carried out. Within the framework of a keyword search, 25 studies were recorded, which contain evaluations of the environmental indicators primary energy and global warming potential in a comparison of the two construction methods for complete buildings with all structural components with a near uniform functional equivalence.

For the two life cycle assessment indicators primary energy demand (total and non-renewable) and global warming potential, it can be seen that in all the studies considered, with the exception of a study series Graubner et al. (2008 and 2013) and Pohl (2017), the timber construction method - irrespective of the selected building materials for the solid construction method and the type of construction within the timber construction method - can show lower environmental impacts. This applies to the system boundary production (module A), the system boundary production to disposal (modules A to C) and cradle to cradle (modules A to D).

However, the variance between the two construction methods in the environmental indicators between the studies is high, since different boundary conditions were used in the studies, which can significantly influence a life cycle assessment. This leads above all to a high variance in the amount of the stated substitution potential of the building material wood.

Therefore, there is a need for further research in many areas for the compilation of comparative life cycle assessments which carry out a sensitivity analysis of different parameters. This applies above all to the consideration of module D (credits), which is in a strong scientific discourse, the investigation of further building use types and the more detailed definition of the boundary conditions for a comparison of construction methods.

For a transparent, "fair" comparison, a uniform application of standards in a life cycle assessment is necessary. The different substitution potentials of wood arise above all from different observation periods in combination with the component service life, the different methodology in balancing the life cycle phases, the different considered modules of the life cycle phases and the inconsistent definition of the functional equivalence of the LCA models to be compared with the two construction methods.

Sensitivity analysis

The results of each study and the environmental indicator considered were evaluated on a cross-study basis to determine how the timber construction method performs relative to the solid construction method. The relevance of individual influencing variables, life cycle phases and building constructions was made clear in the sensitivity analyses carried out in the studies. It was noticeable that the authors mainly limit themselves to residential buildings (single and multi-family houses) when drawing up comparative life cycle assessments, but the proportion of completed wooden buildings in non-residential buildings (17.3 %) is similar to that of EFH (18.8 %). Between 2002 and 2017, the proportion of completions rose by 5.8% for EFH and 3.2% for NWG. This illustrates the need for and potential of further LCA studies with a special focus on other types of building use.

The functional equivalence is defined, among other things, by an identical energy standard or U-value of the building components, energy requirements in the use phase, fire protection requirements, noise protection requirements, building dimensions and type. However, the degree of detail of the description of this functional equivalence varies in the studies. In most cases, a real building in a certain construction method serves as the basis for the life cycle assessment. In a fictitious variance analysis, the building construction is replaced by a different construction method.

In a comparison, the proportion of wood mass in a wooden building is also decisive. The higher the proportion of mineral building materials in a wooden building, the lower is the substitution potential for the building material wood. For this reason, some studies deliberately avoid the modelling of buildings with cellars, for example. The proportion of wood in the buildings investigated is generally less than 10 %. This is of importance, because when comparing the construction methods, the complete building usually consisting of all structural components has to be

compared, whereas a comparison on product or component level cannot give a conclusive statement about the comparison of the two construction methods wood and solid construction.

The influence of different timber construction methods on environmental indicators is less than 10 % when comparing construction methods, e.g. for the comparison of timber frame construction with solid timber construction for global warming potential. For different building materials within the solid construction method, a similarly high maximum difference can be seen in comparison to the timber construction methods. The choice of the mineral building material has a maximum influence of approx. 10 %, whereby masonry building materials such as bricks generally perform better than a polyurethane concrete or reinforced concrete construction method. Compared to conventional concrete, the use of recycled aggregates for steel concrete is particularly advantageous in terms of land consumption for gravel extraction and landfilling of demolition material. The reason for the lower land consumption is the protection of the landfill space. With regard to further environmental pollution, the influences of burning fossil fuels and cement production are of decisive importance, especially in the impact category of global warming potential. The use of recycled aggregates only accounts for a small proportion of this.

Life cycle phases

When considering the proportions of the life cycle phases, energy consumption in the use phase accounts for between 48 % and 79 % of the total primary energy requirement in the life cycle assessments examined, depending on the selected boundary conditions of the life cycle assessment, buildings and system boundaries. In second place is the production phase (modules A1 to A3), whereas the construction phase (modules A4 to A5) and the disposal phase (modules C3 and C4) have comparatively low shares. A similar ratio applies to the environmental indicator global warming potential.

When considering the proportion of the production phase compared to the disposal phase, the effect of the different accounting methods for wood as a building material becomes apparent. Wood consists of about 50% carbon. This can be taken into account during production, but must then, in order to keep the input and output flows balanced, be reported as an emission into the atmosphere again during the disposal phase. According to current standardisation, carbon storage is not included with a negative value in module A Production, but the emptying of the carbon storage from module C is already taken into account in module A. The carbon storage is not included with a negative value in module A Production. The different methodology in the balancing of the building material wood leads to the fact that, with the sole view of the manufacturing phase in study comparisons, large differences can result. The results must therefore always be considered in connection with the framework conditions.

For a building that meets the requirements of EnEV 2014, it is generally assumed that the construction accounts for 30 % of the total environmental impact over the building life cycle and that energy consumption therefore accounts for the lion's share in the use life cycle phase. In a study, a share of the construction was found to be in the range of 70 % at an energy level of 15 kWh for buildings. This shows that in the future, with even higher energy standards, improvements in the life cycle assessment can be achieved primarily through construction methods that are material-efficient and have lower environmental impact.

The transport distance of the building materials has a negative effect on both the primary energy consumption and the CO₂ balance in the event of an increase. This applies to timber and cement construction, whereby an increase in solid construction with cement has a more pronounced effect, especially due to the weight of the material. The fixed transport distances vary greatly in the various studies. It can be deduced from the studies that in Germany and Switzerland, wood from domestic sources is mainly used for timber construction and that the distances are there-

fore rather small. In the vast majority of the studies, however, compared to the other life cycle phases, transport has a little relevant share in the environmental impacts, irrespective of the transport distance. It can also be stated that, in a direct comparison, the percentage share of transport emissions in the fourth study differs only slightly, at 14 %, from that of timber construction (16 %).

The life cycle phase section module D (credits and debits outside the system boundary) deals with environmental impacts and credits resulting from reuse, recovery and recycling potential. According to DIN EN ISO 14044, these are only to be shown for information purposes when drawing up a life cycle assessment. For the individual building material groups and the overall system of buildings, there may be major differences with regard to the potential of the credits. Therefore, the addition of module D to the overall result of the environmental impacts over all life cycle phases, as carried out in some studies (which do not refer to standards), has a very high influence.

When considering the use of the energy content of wood for the substitution of fossil energy sources during combustion or the consideration of the aspect that under the framework conditions of large, sustainably managed forest areas, as they exist in Europe, each trunk used generates space for renewable trees and increases the carbon storage, a non-standardised balancing of the environmental impacts via Modules A-D results in considerably lower environmental impacts compared to solid construction. Therefore, there is still a need for further research in dealing with Module D in order to deal with this aspect.

The comparison of the framework conditions applied in the study, in which the solid construction method performs better, provides information on which parameters lead to deviating results. According to the results of Graubner et al. (2008 and 2013), the solid construction method is at least equivalent to the timber construction method in the environmental indicators when considering the entire life cycle. For individual criteria, the solid construction method is even more favourable. The main reason for this is the combination of the observation period with a higher replacement cycle for wooden components compared to solid construction.

Further life cycle assessment indicators

In addition, a large number of studies have identified further parameters that have a significant influence on a life cycle assessment. Sensitivity analyses were carried out to clarify which aspects are particularly important when comparing construction methods. These include in particular the choice of the period under consideration in combination with the estimated service life of building components, the proportion of wood building materials in a wooden building, the data bank used, the building type, the building location and the life cycle phases taken into account.

Emissions of building components into the interior are not part of the life cycle assessments under consideration. Therefore, this aspect is only addressed below. The question as to whether, for example, a construction method with increased emissions into the interior requires increased energy consumption to increase the ventilation rate is not considered in the comparative life cycle assessments either.

Frequent sources of formaldehyde in timber construction used to be, and in some cases still are, mainly wood-based materials. In the past, these materials were often glued with formaldehyde-based adhesives, but nowadays only low-formaldehyde or formaldehyde-free wood-based materials are used. Solvent emissions from building materials in timber construction are, for example, natural, volatile components such as terpenes from bast and bark components of OSB boards or VOCs from natural resins.

In comparison to timber construction, it can be said about solid construction that in particular textiles, binders in mineral fibre insulation, perforated acoustic ceilings made of plastic and various adhesives represent a source of formaldehyde. In the field of solvents, floor coverings or plasticizers of plastic textiles emit volatile, organic substances that pollute the indoor air. Due to very dense building envelopes and a low natural air exchange, very high formaldehyde concentrations can still occur in modern buildings, which is why a suitable ventilation concept should be applied when constructing a wooden or solid building. A high air exchange rate should be aimed for in order to achieve a room air concentration that is as low as possible in VOCs. In addition, VOC-free construction materials and materials must be used. For hygienic and healthy indoor air in timber construction, chemical wood preservatives and biocidal coating materials should not be used in heated indoor rooms. In solid construction there are no chemical wood preservatives available, but plastic-containing plasters and paint coats can influence the indoor air hygiene. In terms of surface materialisation, solid construction could therefore have an advantage over timber construction.

Conclusion

The present expert opinion "Potentials of Building with Wood" focused on the following topics: "Availability of Construction Wood as a Building Material" and "Comparative Life Cycle Assessments of Wooden and Solid Houses", on which given research questions were comprehensively dealt with taking into account scientific sources.

The task on the topic "comparative life cycle assessments of timber and solid houses" consisted in requesting from scientific journals the environmental impacts of the two construction methods. Primary energy (total and non-renewable) and global warming potential served as leading indicators for the assessment.

In the evaluation of the construction phase, the influence of the transport distances of the building materials (nationally extracted and imported timber or mineral building materials) on the overall balance should also be determined.

For the selected leading indicators it can be seen that in all the studies considered, with the exception of one study series, the timber construction method – irrespective of the selected building materials for the solid construction method and the type of construction within the timber construction method – can show lower values in the leading indicators. This applies to the system boundaries of manufacture (Module A), manufacture to disposal (Modules A to C) and cradle to cradle (Modules A to D). If the system limit modules A to D is used, the timber construction method undercuts the solid construction method most clearly. However, the differences between the studies are greatest here, since there is no uniform understanding of the balance and data basis for Module D credits to date, and at the same time the advantages of wood through the substitution potential in energy recovery and cascade use are potentially high at this point.

In addition, it was found that the transport costs in the manufacturing and construction phase for the building materials only account for a small or negligible proportion of the leading indicators of a life cycle assessment.

However, the analysis of the publications revealed a high variance in the deviation of the two construction methods in the leading indicators between the studies. This is due to the fact that different boundary conditions were used to form the Life Cycle Inventory of the LCA model and that there are deviations in the building models depicted. A sensitivity analysis shows that the

number of influencing adjusting screws (e.g. basements of the building model to be compared, selected database for the building materials) is high.

In all the studies considered, it was generally assumed that the total carbon storage including the soil of the forest from which the building timber originates would not decrease. It was also found that the published Life Cycle Assessments largely use single-family houses and occasionally multi-family houses as a basis for comparison. From this, further research needs can be derived in many areas, such as:

- ▶ Investigation of other types of building use in the non-residential sector, such as office and laboratory buildings, since the proportion of completed buildings in Germany and the growth rate of timber construction are comparable with residential construction
- ▶ Uniform use and definition of parameters for the Life Cycle Inventory, in particular for the component service life, the observation period and the guarantee of functional equivalence
- ▶ Creation of an adequate database and a uniform understanding for the evaluation of Module D (credits): Substitution potential of fossil energy sources and cascade use of wood
- ▶ Influence of the construction method on the operation (e.g. user behaviour, emissions into the interior) of buildings
- ▶ Consideration of further comparisons, such as impact of cascade use of wood, other wood species, types of forest use and imported woods

The array of questions on the environmental effects of construction methods was followed by questions on the availability of construction timber as a building material. The main focus was on the question of how high the potential of nationally available timber actually is.

By comparing the volumes of the domestic use of derbholz and the associated use of forest wood in 2016 with the respective usable raw wood potentials after deduction of the deadwood target stock, it was possible to derive statements for the three forest treatment scenarios to what extent the national raw wood potential will be able to cover the national demand in the future. The core statements are as follows:

- ▶ The use of forest wood for the year 2016 can be covered by the average future national raw wood potentials for both coniferous and deciduous wood for the period up to 2052 (with partially minor substitution of coniferous by deciduous wood) without increasing imports.
- ▶ In the case of the wood preference scenario, the usable potential for both coniferous and hardwood wood clearly exceeds domestic use. It is not necessary to import wood.
- ▶ In the baseline scenario, only the hardwood potential is sufficiently large to cover domestic use. However, a slight substitution of hardwoods for the lack of native wood potential would make it possible to dispense with wood imports.
- ▶ In the nature conservation scenario, the hardwood potential is also large enough to cover domestic use. However, the too low coniferous wood potential cannot be compensated by this. There is a need for imports.

This was followed by the question of which woods would additionally have to be imported from which other countries in the event of an increased timber construction quota and which quality requirements would have to be met by these.

The theoretically possible mean increase potential of the timber construction quota for the period 2013-2052 without increase of the timber import quantities and with constant solid wood utilisation of all other branches of the economy is between 11 and 220 % depending on the WEHAM forest management scenario. In order to also take into account the possible increases in wood consumption in other branches of industry when determining the growth potential in timber construction, the research results of the WEHAM wood use scenarios were evaluated in comparison to the WEHAM forest treatment scenarios. It turned out, however, that due to a lack of data, it was not possible to deduce to what extent timber would have to be imported if the timber construction quota had increased. For this further investigations would be necessary.

Germany is a net importer of solid wood with a current foreign trade balance of approx. +7% (softwood approx. +11%, hardwood approx. -4%). With increasing timber construction quota, it can be assumed that timber imports will also be necessary in the future. However, a quantitative statement cannot be made within the scope of this study. This requires a more detailed analysis taking into account the development of demand for solid wood in all sectors of the economy. It would also be necessary to have statistics with information from the individual EU countries on wood species and their specification by hardwood species and softwood species, their proportion of certified area and the associated foreign trade in timber. Timber imports are subject to legal framework conditions and international agreements. With regard to the quality requirements for timber to be imported, the requirements set out in the Federal Procurement Decree for Wood Products are regarded as the minimum requirement according to which timber to be imported must come from certified, sustainably managed forests. Furthermore, it is recommended to import wood from neighbouring countries if possible in order to keep the environmental impact of the transport route to a minimum. It is also important to avoid ecological relocation effects as the supplier countries have a high degree of self-sufficiency and a high proportion of certified forest areas. Assuming that these indicators will develop similarly for the European states in the future, it is assumed that the neighbouring states Poland, the Czech Republic and France will continue to be relevant (main) supplier countries in the future and could offer an increase in imports for timber construction due to the partially high degree of self-sufficiency. For a more detailed analysis and more concrete statements on timber imports, the development of the demand for timber from all economic sectors would have to be taken into account. An extended database in the form of statistics from EU countries on wood species specified by hardwood species and softwood species, their share of certified area and the associated foreign trade in timber is also needed.

An increase in the timber construction quota without imports but only with an increase in the domestic forestry area is estimated to be unrealistic. At present, there are no free areas for additional forestry use. Due to an existing high competition of different land uses, a land conversion in favour of forestry for a long-term period of time is estimated to be not feasible. Conversion to short-rotation plantations would be insufficient, as their woods (above all poplar and willow) are currently predominantly used for energy purposes. The extent to which these woods could be increasingly used and established as construction timber in the future and the potential of short rotation plantations for increasing the amount of wood used for timber construction and thus resulting in a reduction of wood imports needs further investigation.

For the competition to wood as a building material, the competition to the energetic use is probably relevant also in the future above all. This competition can be reduced by a general reduction of resource consumption. It can be reduced by legal framework conditions that counteract one-

sided promotion of energy use. As far as material use is concerned, competition with furniture construction could arise if more hardwoods (beech, oak, red oak) are used for timber construction. Cascade utilisation is an interesting approach to weaken the competition to timber construction and to manage resources efficiently. Their potential is currently not being fully exploited, mainly due to a lack of quantity and quality of waste wood, but also due to a lack of processes. In order to increase the quantity of waste wood of different quality requirements, a consistent separate collection was included in the amendment of the Commercial Waste Ordinance. Various aspects are also being discussed for the amendment to the Waste Wood Ordinance that could result in more efficient cascade use. Topics include the obligation to collect waste separately and equal consideration of material and energy use. Further measures could be, for example, the use of high-quality waste wood of category AI only for material recycling, consistent sorting of waste at the point of generation (source sorting), monitoring of the obligation to separate waste and counteracting the economic unreasonableness of material recycling by introducing a recycling quota. The continuous further development of technological processes for sorting supports separate collection. In the interests of sustainable management, cascade use for multiple material use must result in a low environmental impact and must also maintain and, at best, expand this in comparison to energy use. Various studies show that there is currently a lack of utilisation and processing concepts for the cascade. The development of these concepts requires, among other things, the development of more efficient combustion processes, but also an optimised conception of logistics, wood processing and wood preparation as well as minimisation of material losses. For the development of cascade concepts, it is recommended to involve all stakeholders along the value chain. The handling of fresh wood is also essential. Its use for material recycling shows significantly lower environmental impacts. In the production of wood-based materials (e.g. chipboard), the use of waste wood instead of fresh wood at the beginning of the production chain has a high potential for resource efficiency and lower environmental impact. It should be noted that in order to shift the use of waste wood from energy to material use, it must be taken into account that the lack of waste wood means that high-quality fresh wood is not used for energy purposes. When shifting waste wood for material instead of energetic use, it is imperative to ensure that the waste wood lacking for energetic use is not replaced by high-quality fresh wood.

A further possibility to increase the timber construction quota without being dependent on additional imports or reforestation of a larger kind is the substitution of hardwood for coniferous wood, which is currently mainly used for structural timber construction products. With the exception of pure solid wood, for which straight, long, well-drying trunk parts are required, and nail plate trusses, the use of hardwood in any timber construction method in the near or distant future is considered possible. At present, the increased use of hardwoods is still partly opposed by a lack of building regulations (such as standards or approvals), partly by technology that has to be adapted (such as gluing or sawing systems that are not always suitable for the usually larger trunk diameters) and above all by the higher price and the lower supply. The latter are due on the one hand to slower growth, but also not least to the aforementioned legal regulations and technological adjustments, the costs of which are added to the prices for timber construction and wood-based materials. There is a need for further research into a more detailed cost analysis, which could also extend to possible incentives for increased use of hardwoods.

Basically, it can be seen that, with regard to the overriding question of how high the ecological added value of timber construction in Germany as a whole is, how this can be increased and how the economic boundary conditions present themselves, the individual aspects must first be clarified more clearly and then linked. In summary, this includes above all:

- ▶ uniform consensus on the evaluation of wood at the end of its life or cascade use within the life cycle assessment
- ▶ Statements on the potential of the timber construction increase rate for different forest use variants and effects on land requirements
- ▶ Analysis of wood use in different economic sectors
- ▶ Potentials of alternative construction methods in the new building sector
- ▶ Development potentials of wood utilisation paths, in particular competition between energy and material utilisation
- ▶ Integral Perspective: Lifecycle analysis involving the players along the value chain
- ▶ Extended statistical data basis with regard to different types of deciduous and Nadel forest wood as well as information on certified area share for Germany and with foreign trade with the EU countries

Only then can the potential contribution of timber construction to the overall balance of climate and environmental protection in Germany be measured under realistic scenarios.

1 Aufgabenstellung und Vorgehensweise

1.1 Verfügbarkeit von Konstruktionsholz als Baustoff

Im Arbeitspaket 1 (AP 1) sollten sämtliche bauphysikalisch geeigneten Holzarten und die verfügbaren Mengen der für den Holzbau (Massivholzbau, Holzständerbauweise, Holzverbundbauweise etc.) genutzten Holzarten dargestellt werden. In der Literatur teilweise sehr widersprüchliche Potenziale sollten aufgezeigt und wissenschaftlich erörtert werden.

Folgende Fragestellungen waren zu behandeln:

- ▶ AP 1.1 – Holzqualitäten für verschiedene Holzbauweisen: Welche Holzqualitäten sind für die verschiedenen Holzbauweisen einsetzbar? (Petra Kubowitz)
- ▶ AP 1.2 – Potenzial und Verteilung national verfügbarer Hölzer:
Wie groß ist das Potenzial der national verfügbaren Hölzer und wie unterscheidet sich die regionale Verteilung innerhalb Deutschlands? (Andrea Untergutsch)
- ▶ AP 1.3 – Potenzial europäisch verfügbarer Hölzer aus nachhaltiger Forstwirtschaft:
Wie groß ist das Potenzial an verfügbaren, aus nachhaltiger Forstwirtschaft stammenden Hölzern im nahen europäischen Umfeld? (Dr. Heidi Mittelbach)
- ▶ AP 1.4 – Erforderliche Holzimporte bei Steigerung der Holzbauquote und Anforderungen:
Welche Hölzer müssten bei entsprechend gesteigerter Holzbauquote zusätzlich aus welchen anderen Ländern (auch nicht-europäisches Ausland) importiert werden und welchen Qualitätsanforderungen haben diese zu entsprechen (Zertifizierung)? (Andrea Untergutsch)
- ▶ AP 1.5 – Konkurrenz bei intensiverer Nutzung von Holz als Baustoff und Kaskadennutzung:
Welche Konkurrenz würde bei intensiverer Nutzung von Holz als Baustoff zu anderen Nutzungsarten, wie beispielsweise in der Möbel- oder Papierindustrie, oder der energetischen Nutzung entstehen? Inwiefern kann diese Konkurrenz durch stärkere Kaskadennutzung umgangen werden und welches Potenzial erschließt sich daraus? (Feng Lu-Pagenkopf, Dr. Heidi Mittelbach)
- ▶ AP 1.6 – Auswirkungen auf die Flächeninanspruchnahme bei Steigerung der Holzbauquote:
Welche zu erwartenden Auswirkungen ergeben sich aus einer Erhöhung der Holzbauquote in Bezug auf die Flächeninanspruchnahme in Land- und Forstwirtschaft? (Dr. Heidi Mittelbach)
- ▶ AP 1.7 – Implikationen aus Waldnutzung:
Welche Implikationen ergeben sich aus einer intensiveren Waldnutzung? (Dr. Heidi Mittelbach)

Wegen teilweiser Überschneidungen und der engen Zugehörigkeit wurden die Arbeitspakete AP 1.3 und 1.4 zusammengefasst und gemeinsam behandelt.

Die ausführlichen Berichtsteile zu Arbeitspaket 1 sind den folgenden Kapiteln 2 bis 7 zu entnehmen. In Kapitel 9 sind die genutzten Quellen angegeben.

1.2 Vergleichende Ökobilanzen von Holz- und Massivhäusern

Im Arbeitspaket 2 (Christoph Wensing, Daniel Kellenberger) wurde ein Literaturreview von Studien mit vergleichenden Ökobilanzen, in denen die Massiv- mit der Holzbauweise verglichen wird, vorgenommen. Grund für den Bedarf eines Vergleiches der Studien ist vor allem die Ursachenfindung für die hohen Abweichungen in den Ergebnissen zu den Ökobilanzindikatoren zwischen den einzelnen Studien.

Es wird auf die folgenden Fragestellungen eingegangen:

- ▶ Erzielt die Holzbauweise im Vergleich zur Massivbauweise bei Betrachtung aller Studien in Bezug auf die Leitumweltindikatoren Primärenergie und Treibhauspotenzial bzw. GWP (über alle Lebenszyklusphasen) bessere Ergebnisse?
- ▶ Welche Ergebnisse erzielen unterschiedliche Konstruktionsvarianten bzw. Baustoffe (Vergleich von z. B. Beton zu RC-Beton, Holzmassivbau zu Holzrahmenbau) innerhalb des Massiv- und Holzbaus?
- ▶ Welche Rolle spielen die Aspekte der Landnutzung und des Nachwuchspotenzials von Holz?
- ▶ Wie unterscheiden sich die Transportwege der Baumaterialien?
- ▶ Welchen Einfluss hat die Gebäudeausstattung und Instandhaltung?
- ▶ Wie müssen folgende weitere Einflussgrößen berücksichtigt werden?
 - Energiestandard
 - Geschossigkeit
 - Kellergeschoss
 - Holzanteil bei Holzgebäuden
 - Dämmstoffe
 - Betrachtungszeitraum
 - Lebensdauer von Bauteilen

Die ausführlichen Berichtsteile zu Arbeitspaket 2 sind Kapitel 8 zu entnehmen. In Kapitel 9 sind die genutzten Quellen angegeben.

2 Holzqualitäten für Holzbauweisen (AP 1.1)

2.1 Überblick

Im Arbeitspaket 1 (AP 1) – Verfügbarkeit von Konstruktionsholz als Baustoff – soll im ersten Schritt (AP 1.1) dargestellt werden, welche Holzqualitäten für die verschiedenen Holzbauweisen einsetzbar sind.

Im Folgenden werden daher zunächst die einsetzbaren Holzbau- und Holzwerkstoffe beschrieben, anschließend die betrachteten Holzbauweisen erläutert und die dafür einsetzbaren Bauprodukte dargestellt und schließlich die verwendbaren Holzarten und -qualitäten zusammenfassend angegeben. Dabei steht der Bereich Hochbau im Fokus. Ingenieurbauwerke (wie Brücken, Tunnel, Türme, Stützwände etc.) sind nicht Bestandteil der Untersuchung. Ebenso werden die Bereiche Baugrubenverbauten und Schalungsbau nicht in die Untersuchung einbezogen.

Im Hochbau kommen Holzbauweisen überwiegend im Ein- und Mehrfamilienhausbau, jedoch auch für Bürogebäude, Hallen, Schulen, Schwimmbäder etc. zum Einsatz. Die folgenden Ausführungen legen den Schwerpunkt auf den Wohnungsbau inkl. wohnähnlicher Betriebsgebäude wie Bürogebäude oder Schulen. Industriegebäude wie Produktionshallen werden nur am Rande einbezogen. Dieser Schwerpunkt wurde anhand der zur Verfügung stehenden Daten sowie der Haupteinsatzbereiche von Holz als Baustoff getroffen. Umfragen im Jahr 2012 durch Mantau et al.¹ ergaben, dass von 13,4 Mio. m³ (b) verbautem Holz fast 80 % im Wohnungsbau (inkl. Modernisierungen) verbaut wurden. Allein ca. 25 % entfallen auf den Ein- und Zweifamilienhausneubau und ca. 50 % auf Modernisierungen. Die folgende Abbildung 1 zeigt die Baubereiche mit den verbauten Holzarten, unterteilt in Nadelholz, Laubholz und Tropenholz. Hier sind sowohl tragende und aussteifende Holzbauteile als auch Dämmplatten und Ausbaumaterialien enthalten. Die Abbildung enthält somit mehr Holzanteile als nur den reinen Baustoff. In allen Bereichen überwiegt der Einsatz von Nadelholz deutlich, weshalb in den folgenden Kapiteln auch jeweils Hinweise zu einem möglichen verstärkten Einsatz von Laubholz aufgenommen sind.

Abbildung 1: Baubereiche mit verbauten Holzarten in 1000 m³ (b) – Baukubikmeteräquivalent

in 1.000 m ³ (b)	Holzarten							
	Nadelholz		Laubholz		Tropenholz		Insgesamt	
	Summe	%	Summe	%	Summe	%	Summe	%
Eigenheime	2.979	88,7	324	9,7	54	1,6	3.356	100
Mehrfamilienhäuser	417	82,0	85	16,7	7	1,3	509	100
Modernisierungen	5.622	82,5	1.047	15,4	149	2,2	6.817	100
Wohnungsbau insgesamt	9.018	84,4	1.456	13,6	209	2,0	10.683	100
Wohnähnliche Betriebsgebäude	268	84,6	47	14,7	2	0,7	317	100
Industriegebäude	651	95,1	31	4,5	3	0,4	684	100
Modernisierungen	1.539	89,3	162	9,4	23	1,4	1.725	100
Nichtwohnbau insgesamt	2.458	90,2	239	8,8	28	1,0	2.726	100
Insgesamt	11.476	85,6	1.696	12,6	237	1,8	13.409	100

Quelle: Mantau et al. (2013): Holzeinsatz im Bauwesen, Thünen Report 9, 2013, Artikel 1, S. 12

¹ Mantau et al. (2013)

2.2 Einsetzbare Holzbaustoffe und Holzwerkstoffe

2.2.1 Allgemeines

Um Holzbau- und Holzwerkstoffe im Bauwesen einsetzen zu können, müssen diese einerseits verfügbar (siehe auch die nachfolgenden Kapitel) und andererseits bauaufsichtlich geregelt sein. Dazu gehört vor allem, dass der Holzbau- oder Holzwerkstoff als Bauprodukt deklariert ist und überwacht wird, dass alle relevanten Materialeigenschaften bekannt sind und dass Regelungen zur Bemessung des Baustoffes vorliegen. Für einsetzbare Bauprodukte muss somit eine CE-Kennzeichnung bzw. ein Überwachungszeichen vorliegen, eine Produktnorm sowie Bemessungs- und Ausführungsnormen oder allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen existieren. Liegen letztere noch nicht vor, kann der Einsatz über eine Zustimmung im Einzelfall geregelt werden. Die folgende Abbildung zeigt die derzeitigen Regelungen von Holzbauprodukten.

Abbildung 2: Regelungen der Holzbauprodukte (Holzbaustoffe und Holzwerkstoffe)

Baustoff	Produktnorm ¹⁾	Bemessungs- und Ausführungsnorm ¹⁾		
		Standsicherheit	Brandschutz Wärmeschutz Schallschutz	
1a. Vollholz-Nadelholz (NH)	DIN EN 14081-1	DIN EN 338 ²⁾	Brandschutz DIN EN 1995-1-2 DIN EN 13501 DIN 4102 M-HFH HolzR	
1b. Vollholz-Laubholz (LH)	DIN EN 14081-1	DIN EN 338 ²⁾		
2. Konstruktionsvollholz (KVH [®])	DIN EN 14081-1	DIN EN 338 ²⁾		
3. Keilgezinktes Vollholz	DIN EN 15497	DIN EN 338 ²⁾		
4. Brettschichtholz (BSH)	DIN EN 14080	DIN EN 14080 bzw. abZ: Z-9.1-xxx oder ETB/ETA-jj/xxxx		
5a. Balkenschichtholz (BaSH)	DIN EN 14080			
5b. Duobalken [®] ; Triobalken [®]	DIN EN 14080	abZ: Z-9.1-440		
6. Brettspertholz (BSP)	DIN EN 16351	abZ: Z-9.1-xxx oder ETB/ETA-jj/xxxx		
7. Massivholzplatten (SWP)	DIN EN 13353 DIN EN 13986	DIN EN 13353 bzw. abZ: Z-9.1-xxx oder ETB/ETA-jj/xxxx		Wärmeschutz DIN 4108
8. Furnierschichtholz (LVL)	DIN EN 14279 DIN EN 14374 DIN EN 13986	abZ: Z-9.1-xxx		Schallschutz DIN 4109
9. Sperrholz	DIN EN 636 DIN EN 13986	DIN 20000-1 abZ: Z-9.1-xxx	Weitere produkt- bezogene Angaben für die bautechnischen Nachweise zum Brandschutz Wärmeschutz und Schallschutz sind in den Produkt- normen zu finden.	
10. OSB-Platten	DIN EN 300 DIN EN 13986	DIN EN 12369-1 bzw. abZ: Z-9.1-xxx oder ETB/ETA-jj/xxxx		
11.1. Kunstharzharzgebundene Spanplatten	DIN EN 312 DIN EN 13986	DIN EN 12369-1		
11.2. Zementgebundene Spanplatten	DIN EN 634 DIN EN 13986	DIN EN 1995-1-1/NA abZ: Z-9.1-xxx		
12. Faserplatten	DIN EN 622 DIN EN 13986	DIN EN 1995-1-1/NA abZ: Z-9.1-xxx		
13. Holzwolle-Platten (WW)	DIN EN 13168	- - -		
14.1. Gipsplatten	DIN EN 520 DIN 18180	DIN EN 1995-1-1/NA bzw. ETB/ETA jj/xxxx		
14.2. Faserverstärkte Gipsplatten	DIN EN 15283-2	abZ: Z-9.1-xxx oder ETB/ETA jj/xxxx		

¹⁾ Es gilt die jeweils letzte bauaufsichtlich eingeführte Norm,
²⁾ Festigkeitsklassen für auf Biegung hochkant beanspruchte Bauhölzer. Bei visuell sortiertem Holz Zuordnung der Sortierklassen zu den Festigkeitsklassen über die DIN EN 1912.

Quelle: Becker, Radovic (2018): Informationsdienst Holz spezial, Baustoffe für den konstruktiven Holzbau, S. 290

Im Jahr 2012 wurden 13,4 Mio. m³ Holz verbaut². Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick über die verbauten Holzbau- und Holzwerkstoffe, den dafür erforderlichen Holzeinsatz, den bei der Umwandlung des geschlagenen Holzes in ein Holzbauprodukt entstehenden Verschnitt sowie die Verteilung auf Nadel- und Laubholz bzw. auf die verschiedenen Holzbauprodukte.

Abbildung 3: Verwendete Holzhalbwaren in 1000 m³ (b) – Baukubikmeteräquivalent

in 1.000 m ³ (b)	Hochbau					
	Verbaut		Verschnitt		Insgesamt	
	Summe	%	Summe	%	Summe	%
Schnittholz	8.079	78,4	2.230	21,6	10.309	100
Spanplatte	262	84,0	50	16,0	311	100
MDF / HDF	820	79,2	215	20,8	1.035	100
OSB	492	88,9	61	11,1	553	100
LDF	1.902	85,9	311	14,1	2.213	100
Furnier	133	78,5	37	21,5	170	100
Sperrholz	154	75,5	50	24,5	204	100
Sonstiges	1.568	86,3	249	13,7	1.817	100
Insgesamt	13.409	80,7	3.203	19,3	16.612	100

Quelle: Mantau et al. (2013): Holzeinsatz im Bauwesen, Thünen Report 9, 2013, Artikel 1, S. 8

Abbildung 4: Verwendete Holzarten in 1000 m³ (b) – Baukubikmeteräquivalent

in 1.000 m ³ (b)	Hochbau					
	Verbaut		Verschnitt		Insgesamt	
	Summe	%	Summe	%	Summe	%
Nadelholz	11.476	81,0	2.695	19,0	14.171	100
Laubholz	1.696	79,2	445	20,8	2.141	100
Tropenholz	237	79,0	63	21,0	300	100
Insgesamt	13.409	80,7	3.203	19,3	16.612	100

Quelle: Mantau et al. (2013): Holzeinsatz im Bauwesen, Thünen Report 9, 2013, Artikel 1, S. 7

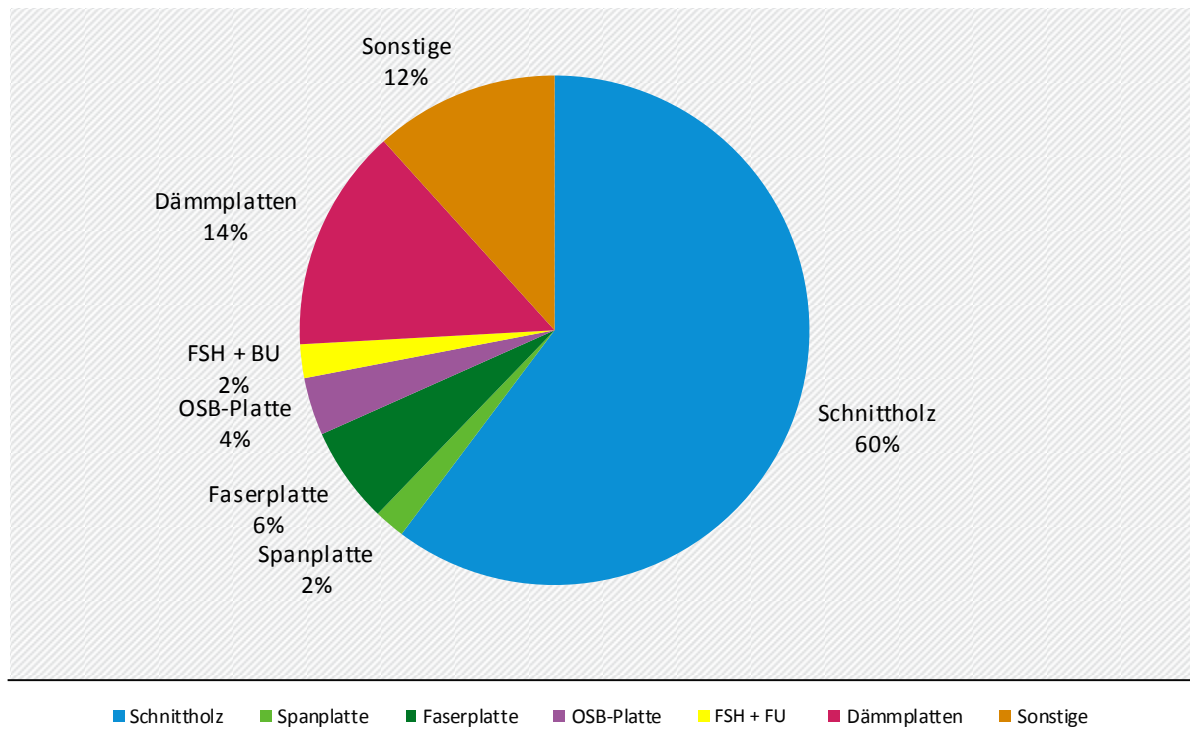
Es wird ersichtlich, dass etwa 20 % Verschnitt entstehen – bei Vollholzprodukten tendenziell etwas mehr, bei Holzwerkstoffen aus sehr kleinen Holzteilen wie Spänen weniger (z. B. Span- oder OSB-Platten). Zudem zeigt sich, dass etwa 60 % der verbauten Holzprodukte Schnittholzprodukte wie beispielsweise Vollholz oder Brettschichtholz sind, etwa 14 % Holzwerkstoffe, welche als tragende Bauteile eingesetzt werden können (z. B. Spanplatten, Faserplatten MDF und HDF, OSB-Platten, Furnierschicht- und Furniersperrholz), weitere ca. 14 % Holzwerkstoffe, welche lediglich als Dämmplatten eingesetzt werden können, wie beispielsweise poröse Faserplatten LDF, und die verbleibenden etwa 12 % sonstige Holzwerkstoffe.

Zudem wird deutlich, dass etwa 85 % aller Holzbauprodukte nadelholzbasiert sind, nur etwa 13 % laubholzbasiert und die verbleibenden 2 % aus Tropenhölzern bestehen.

² Mantau et al. (2013)

Abbildung 5: Verwendete Holzhalbwaren in Prozent (vom insgesamt verbauten Holz)

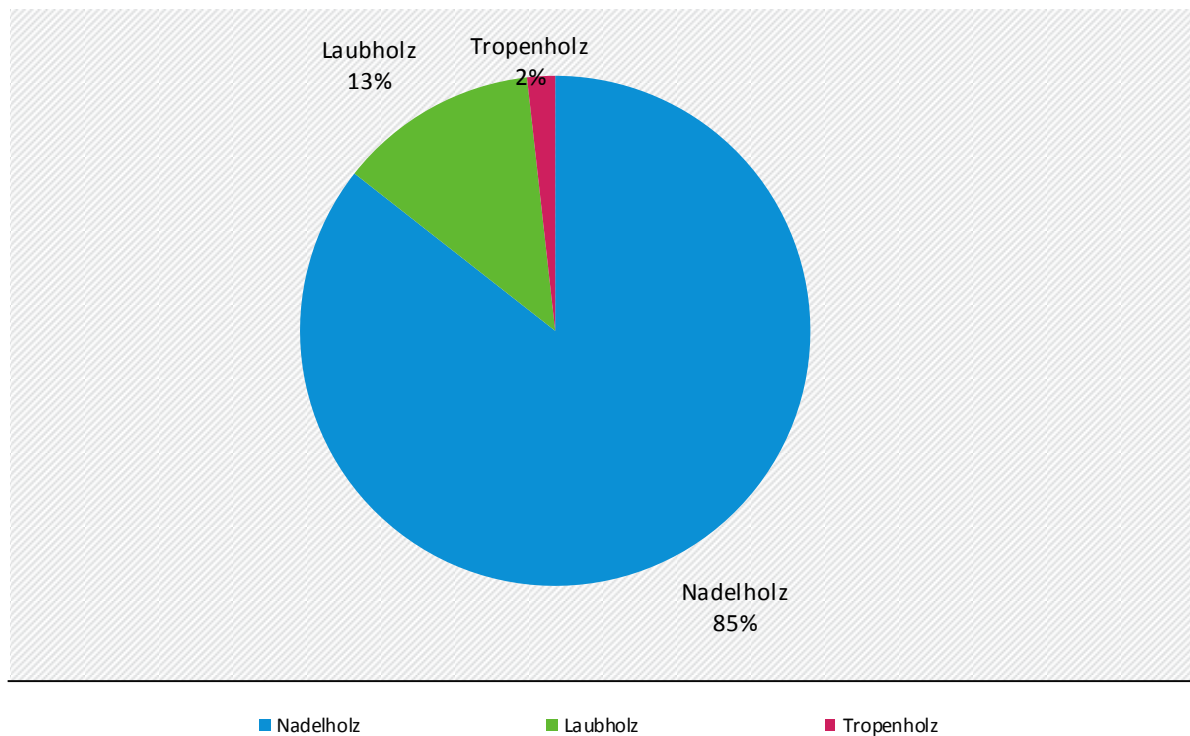
Im Jahr 2012 verbaute Holzbauprodukte



Quelle: erstellt aus Angaben in Mantau et al. (2013)

Abbildung 6: Verwendete Holzarten in Prozent (vom insgesamt verbauten Holz)

Im Jahr 2012 verbaute Holzarten



Quelle: erstellt aus Angaben in Mantau et al. (2013)

Soll der Laubholzanteil gesteigert werden, ist folglich sowohl bei Holzbau- als auch bei Holzwerkstoffen die Verwendung von Laubholz zu verstärken. Dazu sind vorwiegend rechtliche Grundlagen zu schaffen, die dem Einsatz derzeit teilweise entgegenstehen – siehe dazu auch Abbildung 7. Des Weiteren sind jedoch vor allem auch höhere Kosten von Laubholz gegenüber Nadelholz und zum Teil einige typische Eigenschaften von Laubhölzern Gründe für den derzeit eher geringen Einsatz von Laubholz.

Beispielsweise ist zu beachten, dass Laubhölzer in der Regel sowohl schwerer als auch härter sind als Nadelhölzer, was bei Transport und Montage sowie bei Anschlüssen mit stiftförmigen Verbindungsmitteln zu berücksichtigen ist. So müssen Laubhölzer in der Regel vorgebohrt werden, was einen zusätzlichen Arbeitsschritt bedeutet. Auch sind zum Teil höhere Schwind- und Quellwerte zu beachten. Demgegenüber weisen Laubhölzer zum überwiegenden Teil deutlich größere Festigkeiten auf als Nadelhölzer (siehe auch Kap. 2.2.2.1), was wegen der dann kleineren erforderlichen Querschnitte auch wieder zu geringeren Gewichten führt.

Abbildung 7: Verwendbarkeit und Verfügbarkeit von Holzbauprodukten aus Laubholz

		Schnittholz / keilgezinktes Vollholz	Brettschichtholz	Brettsperrholz	Furnierschichtholz	Baufurniersperr- holz / OSB
Ahorn	Verwendbarkeit	EN 14081-1 mit ZiE ⁽¹⁾ /-	ZiE	ZiE	ZiE	EN 13986 mit DIN 20000-1
	Verfügbarkeit	-/-	-	-	-	-/-
Birke	Verwendbarkeit	EN 14081-1 mit ZiE ⁽¹⁾ /-	ZiE	ZiE	ZiE	EN 13986 mit DIN 20000-1
	Verfügbarkeit	x/-	x	x	-	x/-
Buche	Verwendbarkeit	EN 14081-1 mit DIN 20000-5	Z-9.1-679	ZiE	Z-9.1-837 Z-9.1-838 ETA-14/0354	EN 13986 mit DIN 20000-1 abZ Z-9.1-841
	Verfügbarkeit	x/-	x	-	x	x/-
Edel- kastanie	Verwendbarkeit	EN 14081-1 mit ZiE ⁽¹⁾ /-	ETA-13/0646	ZiE	ZiE	EN 13986 mit DIN 20000-1
	Verfügbarkeit	x/-	x	-	-	-/-
Eiche	Verwendbarkeit	EN 14081-1 mit DIN 20000-5	ETA-13/0642	ZiE	ZiE	EN 13986 mit DIN 20000-1
	Verfügbarkeit	x/-	x	-	-	-/-
Esche	Verwendbarkeit	EN 14081-1 mit ZiE ⁽¹⁾ /-	ZiE	ZiE	ZiE	EN 13986 mit DIN 20000-1
	Verfügbarkeit	x/-	(x)	-	-	-/-
Eukalyptus	Verwendbarkeit	EN 14081-1 mit ZiE ⁽¹⁾ /-	ZiE	ZiE	ZiE	EN 13986 mit DIN 20000-1
	Verfügbarkeit	-/-	(x)	-	-	-/-
Pappel	Verwendbarkeit	EN 14081-1 mit ZiE ⁽¹⁾ / EN 15497 mit DIN 20000-7	EN 14080 mit DIN 20000-3	ZiE ⁽²⁾	ZiE	EN 13986 mit DIN 20000-1
	Verfügbarkeit	x/-	(x)	-	-	x/x

⁽¹⁾ Sobald DINEN 14081-1:2016-06 in das offizielle Amtsblatt der Europäischen Union und DIN 20000-5:2016-06 in die Muster-Verwaltungsvorschrift technische Baubestimmungen (MVV TB) aufgenommen ist: EN 14081-1 mit DIN 20000-5.

⁽²⁾ Sobald DINEN 16351:2015-12 in das offizielle Amtsblatt der Europäischen Union und eine Anwendungsnorm der Normenreihe DIN 20000-x in die Muster-Verwaltungsvorschrift technische Baubestimmungen (MVV TB) aufgenommen ist: EN 16351 mit DIN 20000-x.

x = verfügbar
(x) = eingeschränkt verfügbar
- = derzeit nicht verfügbar

Quelle: Torno et al. (2017): Informationsdienst Holz spezial, Konstruktive Bauprodukte aus europäischen Laubhölzern, S.7

Der Kostenfaktor kann im Rahmen dieser Untersuchung nicht näher betrachtet werden. Laubholz ist derzeit in der Regel deutlich teurer als Nadelholz. Beispielsweise erhält ein Waldbesitzer für Stammholz, Stärkeklasse 4 (Mittendurchmesser 40 bis 49 cm), Güteklasse B derzeit etwa 70 €/Fm für Kieferstammholz, etwa 95 €/Fm für Fichtenlangholz, etwa 95 €/Fm für Buchenstammholz und etwa 300 €/Fm für Eichenstammholz³. Ähnlich, jedoch fast noch ausgeprägter, verhält es sich mit Schnittholzpreisen. Laubhölzer werden dabei nur in einem geringeren Umfang als Bauhölzer angeboten. Die Preise liegen derzeit bei ca. 550 €/m³ für Kiefer, ca. 600 €/m³ für Fichte, ca. 750 €/m³ für Buche und ca. 1200 €/m³ für Eiche⁴, wobei die Preise je nach Querschnitt und Herkunft stark schwanken. Die Gründe scheinen sowohl im langsameren Wachstum vieler Laubbäume (so erreicht die Fichte zum Erntezeitpunkt mit 80 bis 120 Jahren eine Baumhöhe von ca. 40 m, die Buche [Rotbuche] zum Erntezeitpunkt mit 120 bis 160 Jahren eine Baumhöhe von ca. 35 m⁵), im deutlich höheren Nadelholzangebot (derzeit noch grundsätzlich sowie jeweils gesteigert nach Sturmschäden oder ähnlichen Kalamitäten) als auch im zumeist höheren Pflegeaufwand der Laubbäume zur Erzielung gleichwertig einsetzbaren Holzes (vor allem bezüglich Astfreiheit, Krümmhaftigkeit und Jahrringstruktur) sowie in den teilweise erforderlichen Sonderregelungen für den Einsatz im Bauwesen zu liegen.

Dies näher zu betrachten wäre Aufgabenstellung einer gesonderten Untersuchung, welche sich gegebenenfalls auch mit Faktoren zur Kostenregulierung bzw. dem Schaffen von Anreizen zum verstärkten Einsatz von Laubholz befassen könnte.

Im Folgenden werden die Holzbau- und Holzwerkstoffe kurz beschrieben, die Verwendung von Laub- oder Nadelholz jeweils angegeben und gegebenenfalls Einschränkungen bezüglich des Einsatzes benannt.

Gipsplatten/Gipskartonplatten sowie Holzwoleleichtbauplatten werden nicht näher betrachtet, erstere, weil sie zwar zu den Holzwerkstoffen zählen, jedoch kein reines Holzbauprodukt darstellen, letztere, da sie – wie auch poröse Faserplatten – nicht als tragende Bauteile sondern lediglich als Dämmplatten eingesetzt werden.

2.2.2 Holzbaustoffe (Bauprodukte aus Vollholz)

2.2.2.1 Vollholz (VH)

Als Vollholz wird Bauschnittholz aus Nadelholz oder aus Laubholz bezeichnet. Je nach Querschnitt werden Vollhölzer beispielsweise als Latten, Bohlen oder Kanthölzer bezogen. Die folgende Abbildung 8 gibt einen Überblick über die gängigen Holzarten und ihre jeweiligen Festigkeits- und Sortierklassen (siehe auch Seite 63f.).

³ Wald-Prinz (2018)

⁴ beispielsweise Mühlbauer Holz GmbH (2018)

⁵ Pohl (2017)

Abbildung 8: Zuordnung von Schnittholz zu Sortier- und Festigkeitsklassen

Holzart		Sortierklasse nach DIN 4074	Festigkeitsklasse nach DIN EN 338
Nadelschmittholz	Douglasie	S7	C18
	Fichte		
	Kiefer		
	Lärche		
	Tanne		
	Douglasie	S10	C24
	Fichte		
	Kiefer		
	Lärche		
	Tanne		
	Douglasie	S13	C35
	Fichte		C30
Kiefer			
Lärche			
Tanne			
Laubschmittholz	Eiche	LS10	D30
	Ahorn	LS10 und besser	D35
	Buche		
	Esche	LS13	D40
	Buche		

Quelle: Becker, Radovic (2018): Informationsdienst Holz spezial, Baustoffe für den konstruktiven Holzbau, S. 184

Für Nadelhölzer wird seit Einführung der europäischen Normung der Buchstabe C (coniferous wood) verwendet, für Laubhölzer der Buchstabe D (deciduous wood). Bei den Nadelhölzern überwiegt die Festigkeitsklasse C24 (der charakteristische Wert – d. h. der 5 %-Quantilwert – der Biegefestigkeit beträgt dabei 24 N/mm²), bei den Laubhölzern die Festigkeitsklassen D30 und D35 (der charakteristische Wert – d. h. der 5 %-Quantilwert – der Biegefestigkeit beträgt dabei 30 N/mm² bzw. 35 N/mm²).

Sowohl Nadelvollholz als auch Laubvollholz kann in den Nutzungsklassen (NKL) 1 bis 3 eingesetzt werden. Die Nutzungsklassen sind normativ definiert. In Nutzungsklasse 1 weisen die Baustoffe einen Feuchtegehalt auf, der einer Temperatur von 20°C und einer relativen Luftfeuchte der Umgebung entspricht, die nur für einige Wochen pro Jahr 65 % übersteigt (bei Nadelhölzern entspricht dies einer mittleren Holzfeuchte von ca. 12 %), in Nutzungsklasse 2 nur für einige Wochen pro Jahr 85 % übersteigt (bei Nadelhölzern entspricht dies einer mittleren Holzfeuchte von ca. 20 %). In Nutzungsklasse 3 treten höhere Feuchtegehalte auf. Bauteile in beheizten Innenräumen können üblicherweise in NKL 1 eingeordnet werden, Bauteile in überdachten Außenbereichen in NKL 2 und freibewitterte Bauteile in NKL 3.

2.2.2.2 Konstruktionsvollholz (KVH)

Als Konstruktionsvollholz wird ein Nadelvollholz bezeichnet, welches technisch getrocknet ist und verschärften Sortierkriterien unterliegt. Ast- bzw. Fehlstellen werden herausgeschnitten, die einzelnen Vollholzteile können mittels Keilzinkung verbunden werden. Konstruktionsvollholz mit Keilzinkung darf derzeit nur in den Nutzungsklassen 1 und 2 verwendet werden.

2.2.2.3 Balkenschichtholz (BaSH)

Balkenschichtholz besteht aus zwei bis fünf flachseitig fasernparallel verklebten Nadelhölzern und wird entsprechend der Lamellenanzahl auch als Duo- oder Triobalken bezeichnet. Die einzelnen Lamellen (Bohlen) sind analog zum Konstruktionsvollholz technisch getrocknet, Fehlstellen sind gegebenenfalls entfernt und die Bohlen können mittels Keilzinkung auf Länge gebracht sein. Auch Balkenschichtholz darf derzeit nur in den Nutzungsklassen 1 und 2 verwendet werden.

2.2.2.4 Brettschichtholz (BSH bzw. GL)

Brettschichtholz besteht aus einzelnen faserparallel verklebten Brettlagen (Lamellen) aus Nadelholz oder Laubholz. Bis vor einiger Zeit wurde Brettschichtholz ausschließlich aus Nadelholz (vorwiegend Fichte) hergestellt, mittlerweile kann Brettschichtholz nach Zulassung auch aus Buche oder Eiche oder als Hybridbrettschichtholz mit äußeren Buchelamellen und inneren Nadelholzlamellen hergestellt werden. Dabei weisen Brettschichthölzer aus Laubholz in der Regel höhere Festigkeiten auf, da die Festigkeiten von Laubholzlamellen üblicherweise höher sind als die von Nadelholzlamellen. Eine neuere Entwicklung stellt Brettschichtholz aus Buchenfurnierschichtholz dar. Dies wird als BauBuche bezeichnet und erreicht sehr hohe Biegefestigkeiten (siehe Kap. 2.2.2.8).

Für Brettschichtholz wird seit Einführung der europäischen Normung die Buchstabenkombination GL (gluelam bzw. glued-laminated) verwendet. Brettschichtholz darf grundsätzlich in den Nutzungsklassen 1 bis 3 verwendet werden, es sind jedoch Einschränkungen hinsichtlich von Universalkeilzinkungen sowie hinsichtlich des verwendeten Klebers zu beachten.

2.2.2.5 Brettsperrholz (BSP)

Brettsperrholz, teilweise auch als Kreuzlagenholz bezeichnet, besteht aus kreuzweise verklebten Lamellen aus Nadelholz. Die Faserrichtung der Nadelholzbretter ist somit wechselweise in Richtung der Brettsperrholzplatte und senkrecht zur Längsrichtung der Sperrholzplatte angeordnet. Dadurch werden die Eigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit vergleichmäßig. Zum Teil werden zudem Zwischenlagen aus Holzwerkstoffen verwendet. Dies stellt dann einen Übergang zu Bauprodukten aus Furnieren, Spänen und Fasern dar.

Brettsperrholz kann in Nutzungsklasse 1 und 2 verwendet werden. Es ist über Zulassungen geregelt. Mittlerweile ist auch Brettsperrholz aus Birke verfügbar, dies muss jedoch jeweils über eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) geregelt werden.

2.2.2.6 Brettstapelholz

Brettstapelelemente werden aus einzelnen Nadelholzbrettern hergestellt, die mit Nägeln, Hartholzdübeln oder Verklebung an den Breitseiten verbunden werden. Bei verklebten Elementen handelt es sich im Prinzip um liegende Brettschichtholzträger. Die Brettstapelbauweise wird zur Massivholzbauweise gezählt.

2.2.2.7 Massivholzplatten (SWP)

Massivholzplatten bestehen aus Nadel- oder Laubholzbrettern, die an ihren Schmalseiten verklebt sind. Bei mehrlagiger Anordnung werden auch die einzelnen Lagen miteinander verklebt (folglich sind dann auch die Breitseiten miteinander verklebt). Die Faserrichtung der Lagen wird dabei jeweils um 90° versetzt angeordnet. Je nach Lagenanzahl werden Massivholzplatten auch als Einschichtplatten, 3-Schichtplatten usw. bezeichnet.

Für Massivholzplatten wird seit Einführung der europäischen Normung die Buchstabenkombination SWP (solid wood panel) verwendet.

Massivholzplatten können grundsätzlich in Nutzungsklasse 1 und 2 verwendet werden, es sind jedoch Einschränkungen der technischen Klassen zu beachten – so darf die technische Klasse SWP/1 (Trockenbereich) nur in Nutzungsklasse 1 verwendet werden. Die Einführung der technischen Klassen stellt einen Übergang zu den Holzwerkstoffen dar.

2.2.2.8 BauBuche

BauBuche ist ein Furnierschichtholz aus Buchenholz, das von der Firma Pollmeier hergestellt wird. Dabei werden ca. 3 mm dicke Schäl furniere faserparallel bzw. kreuzweise verklebt (s. auch Erläuterung unter Punkt 2.2.3.1) und zu Trägern und Platten verarbeitet. Damit liegt ein Zwischenprodukt zwischen Holzbau- und Holzwerkstoffen vor.

BauBuche S wird vorwiegend zur Ausbildung stabförmiger Bauteile eingesetzt. Dazu werden die Platten in Längsrichtung aufgetrennt, um Träger mit kleinen Querschnitten bis zu 60 mm Breite zu gewinnen. BauBuche Q ist mit circa 15 % Querlagen erhältlich und wird für flächige Tragelemente eingesetzt. BauBuche GL70 wird aus faserparallel verleimten, 40 mm dicken BauBuche S Lamellen hergestellt. Dabei werden sehr hohe Festigkeiten erzielt. BauBuche GL70 weist eine charakteristische Biegefestigkeit von 70 N/mm^2 auf und damit den doppelten Wert der charakteristischen Biegefestigkeit eines Bucheschnittholzes (D35) und fast den dreifachen Wert eines Standardbrettschichtholzes GL24.

2.2.3 Holzwerkstoffe (Bauprodukte aus Furnieren, Spänen, Fasern)

2.2.3.1 Furnierschichtholz (FSH)

Furnierschichtholz wird vorwiegend aus geschältem und getrocknetem Nadelholz hergestellt, zum Teil jedoch auch aus ebenso geschältem und getrocknetem Buchenholz. Beim Schälen werden etwa 3 mm dicke Furniere gewonnen, welche zu Platten verklebt werden. Die Faserrichtung der Furnierlagen entspricht für die überwiegende Anzahl der Furniere der Längsrichtung des Furnierschichtholzes. Es können jedoch auch einige Furnierlagen quer dazu angeordnet werden. Furnierschichthölzer mit ausschließlich in Längsrichtung orientierten Furnierlagen werden in den meisten Fällen mit S bezeichnet, Furnierschichtholz mit einigen Querlagen mit Q. Steigt die Anzahl der Querfurniere, wird der Holzwerkstoff als Furniersperrholz bezeichnet.

Für Furnierschichtholz wird seit Einführung der europäischen Normung die Buchstabenkombination LVL (laminated veneer lumber) verwendet. Furnierschichtholz ist in die technischen Klassen LVL/1 bis LVL/3 eingeteilt, für die verschiedene Anwendungsbereiche und Materialkennwerte gelten. Sie sind derzeit noch über Zulassungen geregelt. Der Einsatz von Laubholzfurnieren ist mit Ausnahme der Buche und BauBuche derzeit nicht geregelt. Furnierschichtholz darf grundsätzlich in den Nutzungsklassen 1 bis 3 verwendet werden, es sind jedoch Einschränkungen bei den jeweiligen technischen Klassen zu beachten.

2.2.3.2 Sperrholz (FU bzw. BFU)

Furniersperrholz, oft auch einfach als Sperrholz bezeichnet, zum Teil auch als Baufurniersperrholz, wird aus geschältem und getrocknetem Nadelholz oder Laubholz hergestellt. Beim Schälen werden etwa 1,5 mm bis 3 mm dicke Furniere gewonnen, welche zu Platten verklebt werden. Die Faserrichtung der Furnierlagen wird in der Regel jeweils gewechselt, sodass sich Lagen in Längsrichtung des Sperrholzes mit Lagen senkrecht zur Längsrichtung des Sperrholzes abwechseln. Dadurch werden die Holzeigenschaften vergleichmäßig. Sperrholz aus Buche wird auch als BFU-BU bezeichnet.

Furniersperrholz ist in technische Klassen hinsichtlich Biegefestigkeit (F) und E-Modul (E) eingeteilt, dabei werden jeweils die Nennwerte in Längsrichtung sowie senkrecht dazu angegeben. Derzeit sind 5 Klassen geregelt: F20/10 (E40/20) bis F60/10 (E90/10). Furniersperrholz darf grundsätzlich in den Nutzungsklassen 1 bis 3 verwendet werden, es sind jedoch Einschränkungen bei den jeweiligen technischen Klassen zu beachten.

Weniger verbreitet sind die weiteren Sperrhölzer Baustabsperrholz (BST) und Baustäbchen-sperrholz (BSTAE), welche mit Decklagen aus Furnieren und Mittellagen aus Stäben (bis 30 mm Breite) bzw. hochkant angeordneten Stäbchen (bis 8 mm Breite) ausgebildet sind. Beide sind eine Mischform zwischen Holzbau- und Holzwerkstoffen und über Zulassungen geregelt.

2.2.3.3 Spanplatten

Spanplatten bestehen in der Regel aus Holzspänen, zum Teil aus Holzkleinteilen (Holzspäne, Hobelspäne, Sägespäne) bzw. holzartigen Faserstoffen, die mit einem Bindemittel verpresst werden. Zum Teil werden auch andere nachwachsende Rohstoffe, in Ausnahmefällen auch Kunststoffe, beigemischt. Unterschieden werden kunstharzgebundene und zementgebundene Spanplatten. Kunstharzgebundene Spanplatten sind in die technischen Klassen P4 bis P7 eingeteilt, zementgebundene Spanplatten in die technischen Klassen 1 und 2. Letztere sind über Zulassungen geregelt.

Spanplatten dürfen grundsätzlich in Nutzungsklasse 1 und 2 verwendet werden, es sind jedoch Einschränkungen bei den jeweiligen technischen Klassen zu beachten.

2.2.3.4 Holzfaserplatten

Zur Herstellung von Holzfaserplatten werden Hackschnitzel zerkleinert, unter Dampf aufgeschlossen und anschließend mechanisch zerfasert. Die Platten werden dann im Nass- oder Trockenverfahren unter Hinzufügen von Bindemitteln hergestellt. Der Verbund beim Nassverfahren erfolgt vorwiegend über natürliche Faserbildung (Verfilzung), sodass die Bindemittelgehalte dabei niedrig gehalten werden können. Beim Trockenverfahren wird der Verbund maßgeblich vom Bindemittel erzielt, sodass hier höhere Bindemittelgehalte erforderlich sind. Je nach Rohdichte werden Faserplatten nach dem Nassverfahren in poröse Faserplatten (SB – soft board), mittelharte Faserplatten (MBH – medium board) und harte Faserplatten (HB – hard board) unterteilt. Zusätzlich erfolgt eine Unterscheidung für den Innen- und Außenbereich. Damit liegen einige technische Klassen vor, die durch die jeweilige Buchstabenkombination eingeordnet werden können. Faserplatten nach dem Trockenverfahren werden mit MDF (medium density fibreboard oder mitteldichte Faserplatte) bezeichnet und sind in zwei weiteren technischen Klassen verfügbar.

Faserplatten dürfen grundsätzlich in Nutzungsklasse 1 und 2 verwendet werden, es sind jedoch Einschränkungen bei den jeweiligen technischen Klassen zu beachten. Ihre Verwendung ist zum Teil noch in Zulassungen geregelt.

2.2.3.5 OSB-Platten

OSB-Platten sind Mehrschichtplatten aus Nadel- oder Laubholz, deren einzelne Lagen aus langen ausgerichteten Holzspänen (in der Regel ca. 0,6 mm x 75 mm x 35 mm) bestehen, welche durch Bindemittel verklebt werden und der Platte ihren Namen geben: OSB (oriented strand board). Die Späne der Mittellagen sind meist rechtwinklig zu denen der Außenlagen orientiert, sie können jedoch auch zufällig angeordnet sein. Die Späne der Außenlagen sind parallel zur Längsrichtung ausgerichtet.

OSB-Platten sind in die technischen Klassen OSB/2 bis OSB/4 eingeteilt. Sie dürfen grundsätzlich in Nutzungsklasse 1 und 2 verwendet werden, es sind jedoch Einschränkungen bei den jeweiligen technischen Klassen zu beachten.

2.2.3.6 Neuartige Holzwerkstoffe

Es existiert eine Vielzahl innovativer Holzwerkstoffe bzw. Holzbauprodukte, von denen sich die meisten jedoch noch im Versuchsstadium befinden und einige weitere sich nach kurzzeitiger

Verwendung nicht durchgesetzt haben. Es soll jedoch nicht unterschlagen werden, dass es solche Produkte gibt und diese zum Teil auch im Holzbau eingesetzt werden. Die Betrachtung solcher innovativen Produkte würde den Rahmen dieser Untersuchung jedoch sprengen.

2.2.4 Einstufung der Holzbauprodukte

Sämtliche geregelten Holzbauprodukte sind hinsichtlich von Festigkeit, Steifigkeit und Wichte in Klassen eingestuft. Für die Holzbaustoffe gelten Festigkeitsklassen, für die Holzwerkstoffe technische Klassen, die neben den für die Tragfähigkeit maßgebenden Eigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit auch den Einsatzbereich regeln. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über die geregelten Klassen.

Abbildung 9: Zuordnung von Schnittholz zu Sortier- und Festigkeitsklassen

Bauprodukte	Einstufung												
Vollholz Nadelholz ¹⁾ Laubholz ¹⁾	Festigkeitsklassen												
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	
Konstruktionsvollholz KVH ^{® 1)}	Festigkeitsklassen												
	C24			C27			C30			C35			
Keilgezinktes Vollholz Nadelholz ¹⁾ Laubholz ¹⁾	Festigkeitsklassen												
	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35	C40	C45	C50	
Brettschichtholz kombiniert ¹⁾ homogen ¹⁾	Festigkeitsklassen												
	GL 20c	GL 22c	GL 24c	GL 26c	GL 28c	GL 30c	GL 32c	GL 20h	GL 22h	GL 24h	GL 26h	GL 28h	GL 30h
Balkenschichtholz	Es gelten die Einstufungen der Lamellen wie Vollholz - Nadelholz												
Brettsperrholz	Nadelholz und Abmessungen gemäß der abZ oder der ETB/ETA												
Massivholzplatten SWP ²⁾ mit Normenwerten mit deklarierten Werten	Trockenbereich				Feuchtbereich				Außenbereich				
	SWP/1 S				SWP/2 S				SWP/3 S				
	SWP/1 SD				SWP/2 SD				SWP/3 SD				
Furnierschichtholz LVL ²⁾	Trockenbereich				Feuchtbereich				Außenbereich				
	LVL/1				LVL/2				LVL/3				
(Furnier)Sperrholz ¹⁾ nach der Biegefestigkeit nach dem Biege-E-Modul	Rohdichte $\geq 350 \text{ kg/m}^3$				Rohdichte $\geq 600 \text{ kg/m}^3$								
	F20/10		F20/15		F40/30		F50/25		F60/10				
	E20/40		E30/25		E60/40		E70/25		E90/10				
OSB-Platten ²⁾	Trockenbereich				Feuchtbereich								
	OSB/2				OSB/3				OSB/4				
Spanplatten ²⁾ kunstharzgebunden zementgebunden	Trockenbereich				Feuchtbereich								
	Typ P4		Typ P6		Typ P5				Typ P7				
	Technische Klasse 1				Technische Klasse 2								
Faserplatten ²⁾ harte Platten mittelharte Platten	Trockenbereich				Feuchtbereich								
	HB.LA				HB.HLA1				HB.HLA2				
	MBH.LA1		MBH.LA2		MBH.HLS1		MBH.HLS2						
Holzwohle-Platten	entfällt für den Nachweis der Standsicherheit												
Gipsplatten ³⁾ nach DIN 18180 nach DIN EN 520	Gips-Bauplatte				Gips-Feuerschutzplatte								
	GKB		GKBI		GKF				GKFI				
	Typ A		Typ H2		Typ DF				Typ DFH2				
Faserverstärkte Gipsplatten ³⁾	Standard				Platten mit speziellen Eigenschaften								
	GF		GF-D		GF-H		GF-W		GF-I		GF-R		

¹⁾ Einstufung nach Festigkeitsklassen,

²⁾ Klassifizierung nach ihrer Verwendung (nicht tragend oder tragend) im Trocken-, Feucht- und Außenbereich,

³⁾ Klassifizierung der Plattentypen nach ihren Eigenschaften.

Quelle: Becker, Radovic (2018): Informationsdienst Holz spezial, Baustoffe für den konstruktiven Holzbau, S. 292

2.3 Holzbauweisen

2.3.1 Allgemeines

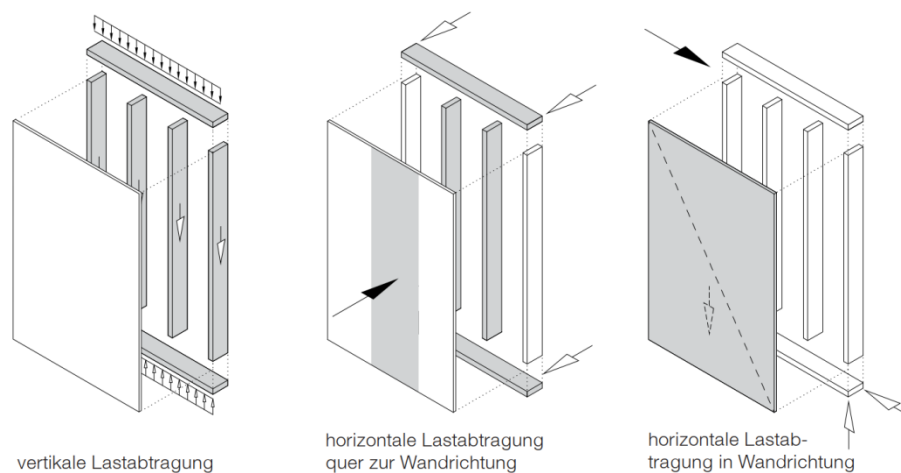
Im Folgenden werden die im Wohnungsbau (inkl. wohnähnlicher Betriebsgebäude) und Hallenbau in Deutschland zur Ausführung kommenden Holzbauweisen dargestellt und kurz erläutert.

Betrachtet werden die Holzbauweisen Holztafelbau, Holzskelettbau, Massivholzbau sowie Holz-betonverbundkonstruktionen. Nagelplattenbinder und zimmermannsmäßige Dachkonstruktionen sowie Holzbinderkonstruktionen für den Hallenbau werden ebenfalls berücksichtigt. Die vorgenommene Reihenfolge soll dabei keine Wichtung darstellen. Der klassische Blockhausbau mit Rundholz sowie die Fachwerkbauweise werden im Rahmen dieser Untersuchung nicht betrachtet, da sie für den heutigen Holzhausbau von untergeordneter Bedeutung sind. Eine bei Ein- und Zweifamilienhäusern des Öfteren ausgeführte Blockhausbauweise mit Kanthölzern wird hier mit zum Massivholzbau gezählt. Eine als Holzmastenbauart bezeichnete Bauweise mit direkt im Baugrund eingespannten Rundholzstützen wird nicht in die Untersuchung mit einbezogen, da sie lediglich für untergeordnete Hallenbauten, nicht jedoch für Wohngebäude und wohnähnliche Betriebsgebäude zur Ausführung kommt.

2.3.2 Holztafelbau

Bei der Holztafelbauweise (auch als Holzständer- oder Holzrahmenbauweise bezeichnet) liegt eine Verbundkonstruktion aus Rippen und ein- oder beidseitiger Beplankung vor. Die Beplankungen wirken dabei statisch mit (im Gegensatz zu Bekleidungen). Sie gelten als mittragend, wenn sie für den Lastabtrag herangezogen werden und/oder als aussteifend, wenn sie für die Knick- bzw. Kippaussteifung der Rippen genutzt werden. In der Regel sind Rippen und Beplankungen mit nachgiebigen Verbindungsmitteln (wie beispielsweise Nägel oder Schrauben) miteinander verbunden. Kräfte teilen sich daher unter Berücksichtigung der jeweiligen Steifigkeiten auf Rippen und Beplankung auf. Die Holztafeln können als Scheibe (Lastangriff in Tafelebene) oder Platte (Lastangriff senkrecht zur Tafelebene) belastet sein. Die Aussteifung solcher Holztafelkonstruktionen erfolgt über die Holztafeln selbst, welche als Wand- und Deckenscheiben eingesetzt werden und daher neben Vertikal- auch Horizontallasten abtragen. Entsprechend des Einsatzortes werden die Elemente als Wand-, Decken- oder Dachtafeln bezeichnet.

Abbildung 10: Lastabtrag einer Holztafel



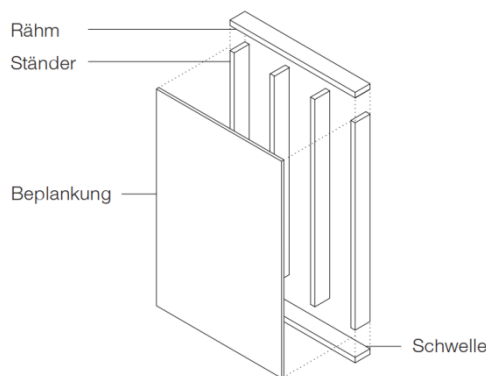
Quelle: Kaufmann et al. (2017): Atlas mehrgeschossiger Holzbau, Kap. B2 (Krötsch, Huß: Bauteile und Bauelemente), S. 53

Für Ständer, Rähm und Schwelle wird üblicherweise Konstruktionsvollholz verwendet, seltener Vollholz, noch seltener Brettschichtholz. Damit bestehen diese Bauteile überwiegend aus Nadelholz, ein Einsatz von Laubholz ist jedoch möglich (s. dazu auch Kap. 2.2).

Als Beplankung werden Holzwerkstoffplatten verwendet. Sowohl Furnierschichtholz und Furniersperrholz als auch OSB-Platten und zum Teil auch Spanplatten und Faserplatten werden eingesetzt. Die Beplankung besteht somit aus Nadelholz, aus Laubholz oder aus einer Mischung aus beidem. Derzeit überwiegen hierbei Nadelhölzer. Es gibt jedoch keinen Hinderungsgrund verstärkt Laubholzprodukte einzusetzen, sofern dieser Wunsch besteht.

Typische Beispiele sind die sogenannten Fertighäuser: Ein- und Mehrfamilienhäuser diverser Holzfertighausanbieter wie beispielsweise Haas, Schwörer, Fjorborg, Danhaus, Baufritz etc.

Abbildung 11: Schematischer Aufbau einer Holztafel



Quelle: Kaufmann et al. (2017): Atlas mehrgeschossiger Holzbau, Kap. B2 (Krötsch, Huß: Bauteile und Bauelemente), S. 53

Die Vorteile der Holztafelbauweise liegen in der Vorfertigung und der dadurch bedingten schnellen Montage. So werden für Fertighäuser in der Regel Wand-, Decken- und ggf. auch Dachtafeln komplett vorgefertigt – inkl. Dämmung, Abdichtung, Unterputz, Fenster, Vorinstallation – und zur Baustelle geliefert. Auf der Baustelle müssen die Tafeln dann lediglich eingehoben und verbunden werden.

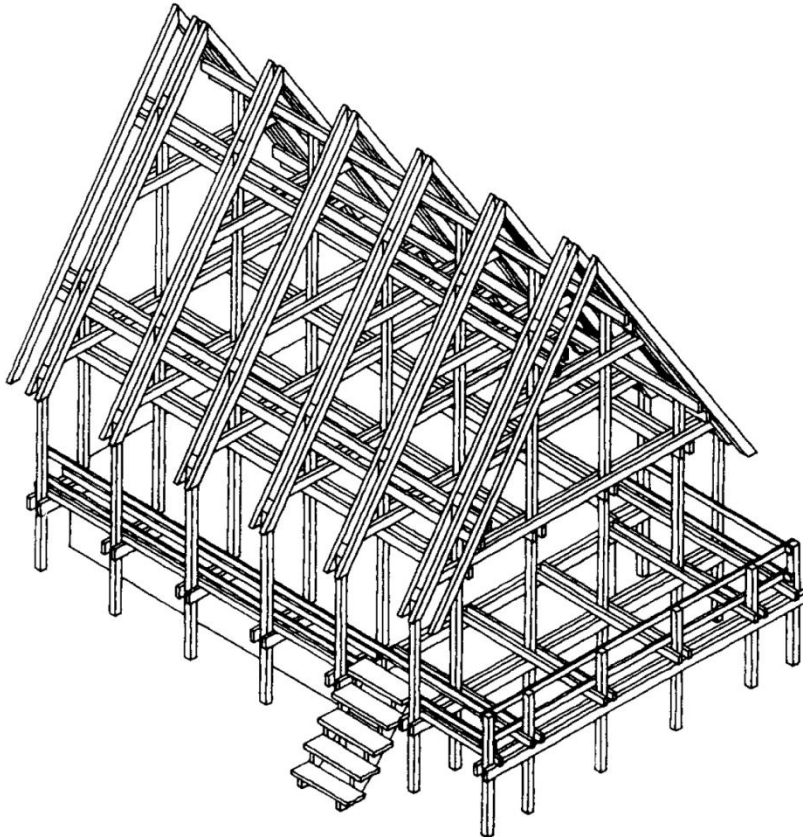
2.3.3 Holzskelettbau

Bei Holzskelettbaukonstruktionen (teilweise auch als Holzrahmenkonstruktionen bezeichnet, obwohl nicht alle Skelettbauten Rahmenkonstruktionen sind und als Holzrahmenbau häufig eher Holztafelbaukonstruktionen verstanden werden) handelt es sich um Stützen-/Riegelkonstruktionen, deren tragende Struktur – die Stützen als vertikale Bauteile und die Riegel als horizontale Bauteile – unabhängig von Raumtrennwänden etc. erstellt wird, sodass hinsichtlich des Ausbaus eine hohe Flexibilität erzielt wird – analog beispielsweise zum Stahlbetonskelettbau. Wegen der lohnintensiven Knotenpunkte und der gewünschten Flexibilität wird in der Regel ein Stützen- und Riegelraster mit möglichst großen Abständen bevorzugt. Die Aussteifung geschieht über das Holzskelett selbst oder über zusätzliche Aussteifungssysteme. In der Regel wird die horizontale Aussteifung durch Verbände oder Deckenscheiben realisiert, die vertikale Aussteifung durch Verbände, Rahmen, eingespannte Stützen, Wandscheiben oder auch massive Stahlbetonkerne.

Stützen und Riegel bestehen üblicherweise aus Konstruktionsvollholz oder Brettschichtholz. Damit bestehen diese Bauteile überwiegend aus Nadelholz. Ein Einsatz von Laubholz ist jedoch möglich (siehe dazu auch Kap. 2.2).

Typische Beispiele sind die sogenannten HUF-Häuser: Ein- und Mehrfamilienhäuser der Firma HUF, welche auch als Fachwerkhäuser bezeichnet werden. Dies aufgreifend könnte ein Holzskelettbau auch als Holzfachwerkbau ohne die für letzteren typische Ausfachung bezeichnet werden.

Abbildung 12: Prinzipdarstellung eines Holzskelettbaus



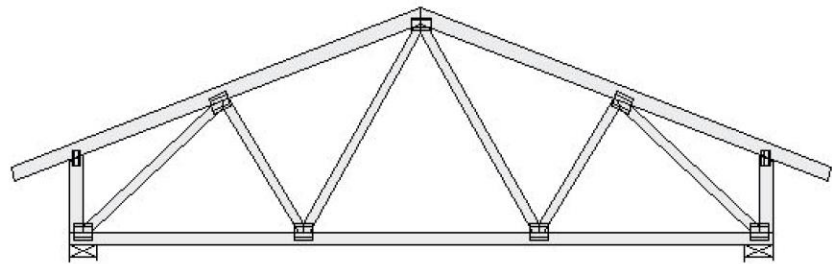
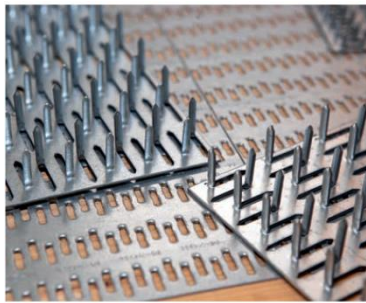
Quelle: Scheer, Kubowitz (2005): Skript zur Vorlesung Baukonstruktion II - Holzbau, S. G13

2.3.4 Nagelplattenbinder

Nagelplattenbinder sind Holzfachwerkbinder, deren Knotenpunkte mit Nagelplatten ausgeführt sind. Solche Nagelplatten bestehen aus Stahlblechen mit ausgestanzten, umgebogenen „Nägeln“, die in die Holzbauteile eingepresst werden. Nagelplattenbinder werden daher immer im Werk vorgefertigt, um den gleichmäßigen Anpressdruck aufzubringen. Die Vorteile liegen in der Vorfertigung und der dadurch bedingten schnellen Montage auf der Baustelle sowie den geringen Holzquerschnitten.

Nagelplattenbinder sind durch Zulassungen geregelt. Sämtliche Holzbauteile – also die Gurte, Pfosten und Diagonalen der Fachwerkträger – bestehen in der Regel aus Nadelvollholz, es können jedoch auch Konstruktionsvollholz, Brettschichtholz, Balkenschichtholz oder Furnierschichtholz (ohne Querlagen) verwendet werden, wenn die entsprechende Zulassung diese Materialien nennt. Nagelplattenbinder aus Laubholz sind derzeit nicht geregelt und nicht verfügbar. Wegen der höheren Kosten und der größeren Härten, die das Einpressen der Nagelplatten erschweren können, wird ein Einsatz von Laubholz hier nur in Ausnahmefällen als sinnvoll erachtet.

Abbildung 13: Abbildung Nagelplatte und Prinzipdarstellung Nagelplattenbinder



Quelle: GIN (2017): Informationsdienst Holz, holzbau handbuch Reihe 2, Teil 1, Folge 3, S. 5 (links) und S. 47 (rechts)

2.3.5 Dachkonstruktionen – Steildächer

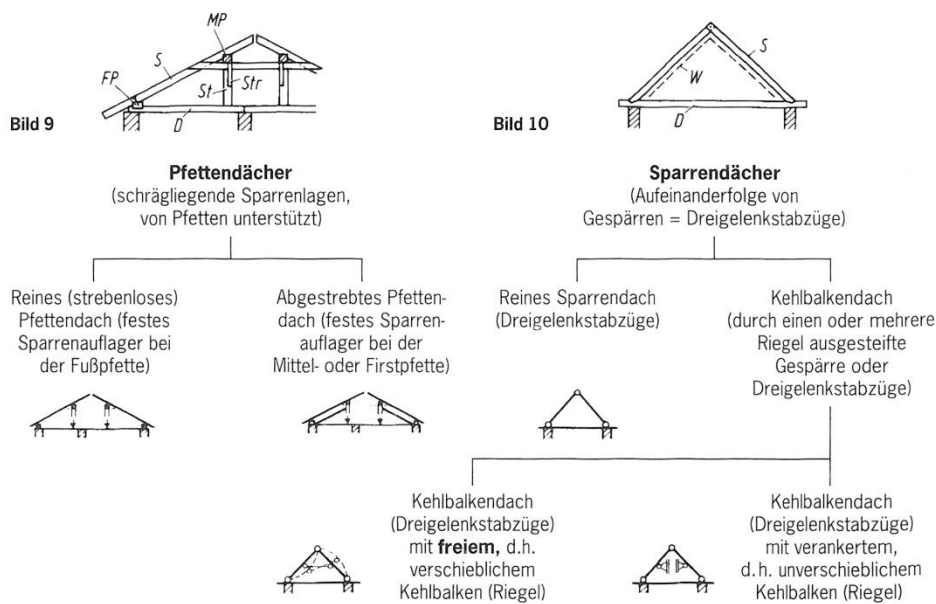
Die gängigen Dachkonstruktionen für Steildächer in Holzbauweise sind Sparrendächer, Kehlbalkendächer und Pfettendächer. Vor allem im Ein- und Mehrfamilienhausbau finden diese Dachkonstruktionen Verwendung – sowohl bei Holzbauten als auch bei Massivbauten aus Mauerwerk oder Stahlbeton, bei welchen dann nur das Dachgeschoss in Holzbauweise erstellt wird. Flachdächer in Holzbauweise kommen hingegen eher selten vor. Sie sind jedoch bei Holztafelbauweisen oder Massivholzbauweisen mit erfasst.

Sparrendächer weisen als Haupttragelement die geneigten Sparren auf, welche die Lasten in den Fußpunkten in die Außenwände einleiten. Für die Aussteifung in Dachlängsrichtung werden Windrispenbänder oder als Scheibe wirkende Beplankungen angeordnet. Die Aussteifung in Dachquerrichtung erfolgt über die Sparren selbst.

Kehlbalkendächer sind erweiterte Sparrendächer, bei denen in der oberen Dachhälfte die Kehlbalkenebene angeordnet ist. Unterschieden wird zwischen verschiebbaren und nicht verschiebbaren Kehlbalkendächern. Bei den verschiebbaren Kehlbalkendächern kann sich das Dach wie bei einem reinen Sparrendach in Querrichtung horizontal nahezu ungestört verformen, die Sparren sind lediglich über die Kehlbalken gekoppelt. Bei einem nicht verschiebbaren Kehlbalkendach wird die Kehlbalkenebene durch Verbände oder Beplankungen als Scheibe ausgebildet und mit den Giebelwänden verbunden, sodass Horizontalkräfte aufgenommen und abgetragen werden können. Der Anschlusspunkt Sparren/Kehlbalken ist daher in Dachquerrichtung gehalten und die Verformungen somit deutlich geringer.

Pfettendächer können als strebenlose oder abgestrebte Pfettendächer ausgeführt werden. In beiden Fällen liegen die Sparren auf in Dachlängsrichtung verlaufenden Pfetten auf, mindestens auf Fuß- und Mittelpfette, zum Teil auch auf Fuß-, Mittel- und Firstpfette. Die Sparren dienen dabei nicht mehr der Queraussteifung sondern leiten ihre Lasten in die Pfetten weiter. Strebenlose Pfettendächer kommen nur bei geringen Dachneigungen und kleinen Hausbreiten zum Einsatz, da in diesem Fall sämtliche Horizontallasten in Dachquerrichtung lediglich über die Fußpfetten abgetragen werden und die Mittelpfetten nur auf Stützen aufliegen. Abgestrebte Pfettendächer werden mit Windbock oder Windstuhl ausgeführt. Horizontallasten in Dachquerrichtung werden dabei über die Windböcke (bestehend aus Stiel und Strebe) oder den Windstuhl (bestehen aus Stielen, Streben und Zange) abgetragen. In Dachlängsrichtung erfolgt die Aussteifung über sogenannte Kopfbandbalken – bestehend aus den Pfetten, den Stielen und den Kopfbändern (Abstreburger zwischen Stiel und Strebe).

Abbildung 14: Pfetten- und Sparrendächer



Quelle: Halász, Scheer (1996): Holzbau-Taschenbuch, Band 1, Kap. 13 (Heimeshoff, Scheer: Hausdächer), S. 420

Sämtliche Holzbauteile, also die Sparren, Kehlbalken, Pfetten, Stiele, Streben, Zangen und Kopfbänder werden in der Regel aus Nadelvollholz oder Konstruktionsvollholz hergestellt, bei größeren Bauteilabmessungen kommen auch Brettschichthölzer zum Einsatz, dies betrifft vor allem die Pfetten. Damit bestehen diese Bauteile überwiegend aus Nadelholz, ein Einsatz von Laubholz ist jedoch möglich (siehe dazu auch Kap. 2.2).

2.3.6 Massivholzbau

Als Massivholzbauweise wird eine Holzbauweise mit massiven, ununterbrochen durchgehenden (im Unterschied zu mit Abstand angeordneten Trägern, Stützen, Rippen etc.) Wand-, Decken- und Dachelementen bezeichnet.

Abbildung 15: Massivholzbau mit Brettstapeldecke, Unterzügen und Brettsperrholzwänden



Quelle: <http://www.holz-leipold.de/>

Die einzelnen Elemente sind in der Regel als Brettstapelelemente oder Brettsperrholzelemente ausgeführt. Damit bestehen diese Bauteile nahezu ausschließlich aus Nadelholz. Ein Einsatz von Laubholz wäre für Brettsperrholzelemente jedoch möglich und für Brettstapelelemente grundsätzlich denkbar. Zulassungen existieren für solche Elemente jedoch noch nicht. Auch Furnierschichtholzelemente können eingesetzt werden, womit ein Laubholzeinsatz verstärkt ermöglicht wird. Bei strenger Auslegung des Begriffs Massivholzbau würden solche Elemente jedoch nicht betrachtet werden.

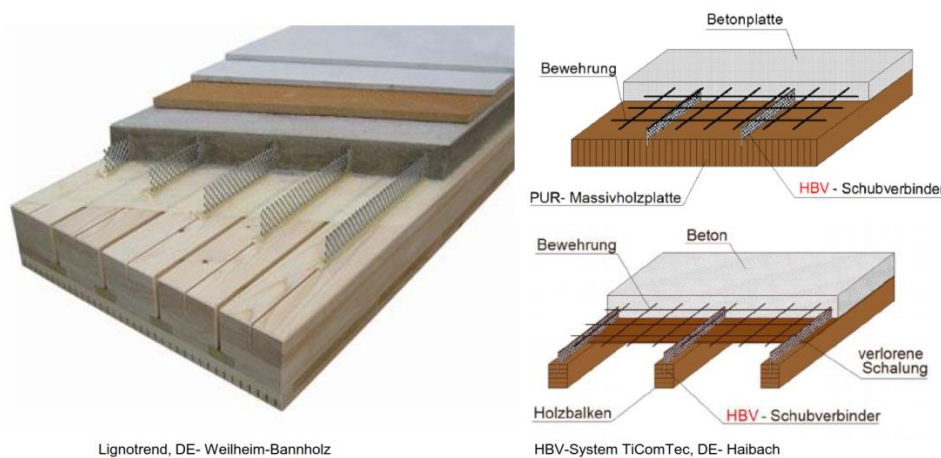
Holzbetonverbundkonstruktionen stellen einen Sonderbereich des Massivholzbaus dar, wenn sie mit plattenförmigen Holzbauteilen erstellt werden. Mittlerweile werden sie so häufig eingesetzt, dass sie als eigenständige Bauweise angesehen werden. Sie werden daher nachfolgend gesondert aufgeführt.

2.3.7 Holzbetonverbundbauweise / Holzhybridbauweise

Unter Holzbetonverbundkonstruktionen, in letzter Zeit auch vermehrt als Holzhybridkonstruktionen bezeichnet, werden Deckenkonstruktionen aus einem Verbund aus einer oberen Stahlbetonplatte und unteren Holzbalken oder Massivholzdeckenelementen bezeichnet. Holz- und Stahlbeton werden dabei durch spezielle Schubverbinder, Nocken, Kerfen oder auch schräge Schrauben verbunden und beteiligen sich unter Berücksichtigung ihrer Steifigkeiten sowie der Verbindungsmittelsteifigkeit jeweils prozentual am Lastabtrag.

Abbildung 16: Prinzip Holzbetonverbunddecke

https://www.eco-bau.ch/resources/uploads/Fachtagungen/Fachtagung2018/A1-1_Mueller.pdf



Quelle: Müller (2018): Fachtagung eco-bau, NNBS, Workshop A1: Hybridbauweise 2.0, Vortragsunterlage S. 6

Die plattenförmigen Holzbauteile der Holzbetonverbundkonstruktionen sind üblicherweise als Brettstapelelemente, seltener als Massivholzplatten oder als Brettsperrholzplatten ausgebildet. Sie bestehen somit nahezu ausschließlich aus Nadelholz (siehe auch Kap. 2.2.2). Stabförmige Holzbauteile – Holzbalken – werden in der Regel aus Konstruktionsvollholz, seltener aus Brett-schichtholz gefertigt. Sie bestehen nahezu ausschließlich aus Nadelholz. Der Einsatz von Laubholz wäre grundsätzlich denkbar, jedoch sind die Regelungen der Verbindungsmittel zu beachten. Derzeit sind den Autoren keine Zulassungen für Laubholz bekannt.

2.3.8 Hallenbau – Holzbinderkonstruktionen

Im Bereich Hallenbau werden vorwiegend Brettschichtholzbinder bzw. -rahmen und Fachwerk-binder eingesetzt. Als Stützen kommen in der Regel Brettschichtholz- oder Stahlbetonstützen

zum Einsatz. Da die Untersuchung sich schwerpunktmäßig mit Wohngebäuden und wohnähnlichen Gebäuden befasst, wird der Bereich Hallenbau nicht näher beleuchtet, Brettschichtholz- und Fachwerkbinder werden jedoch als eigene Konstruktionen mit betrachtet. Schalenskonstruktionen sind nicht Bestandteil der Analyse.

2.3.8.1 Brettschichtholz binder und -stützen

Wie der Name sagt, bestehen Brettschichtholz binder und -stützen und somit auch Brettschichtholzrahmen, aus Brettschichtholz. Sowohl gerade oder gevoutete (angeschnittene) als auch gekrümmte Ausführungen sind möglich. Bei Rahmenkonstruktionen sind zumindest die Stützen, oft auch die Binder, gevoutet ausgebildet, um eine möglichst große Rahmenecke realisieren zu können. Die Binder werden je nach Dachform auch als Satteldachträger (mit geradem oder gekrümmtem Untergurt), als gekrümmte Träger oder als Pultdachträger bezeichnet. Die folgende Abbildung 17 zeigt einen Satteldachbinder mit gekrümmtem Untergurt.

Abbildung 17: Brettschichtholz binder einer Hallenkonstruktion



Quelle: <http://www.zimmerei-reumann.at/holzbau-zimmerei/holzhalle/>

Die Brettschichtholzbauteile werden überwiegend aus Nadelholz gefertigt, es sind jedoch auch Brettschichtholzträger aus Laubholz (Buche, Eiche, BauBuche) oder Hybridträger aus Nadelholz mit Randlamellen aus Laubholz möglich. Für diese Laubholzbrettschichthölzer existieren Zulassungen (siehe dazu auch Kap. 2.2).

2.3.8.2 Fachwerkbinder

Fachwerkbinder bestehen aus stabförmigen Holzbauteilen, welche an den Knotenpunkten über zimmermannsmäßige Verbindungen oder Stahlbleche (außenliegende Lochbleche oder innenliegende Schlitzbleche) und stiftförmige Verbindungen wie Stabdübel, Passbolzen oder Schrauben, seltener auch Nägel, verbunden werden. Werden Fachwerkbinder mehrteilig ausgebildet, kann auf die Stahlbleche verzichtet werden und die Holzbauteile werden – hintereinanderliegend – mit stiftförmigen Verbindungsmitteln oder Dübeln besonderer Bauart verbunden. Wird die Verbindung mit Nagelplatten ausgeführt, werden die Fachwerkbinder als Nagelplattenbinder bezeichnet, diese werden hier als eigene Bauweise aufgeführt (siehe Kap. 2.3.4).

Die Holzbauteile der Fachwerkträger – also die Gurte, Pfosten und Diagonalen – bestehen aus Vollholz oder Konstruktionsvollholz, seltener aus Brettschichtholz. Sie werden für den Hallenbau überwiegend aus Nadelholz gefertigt, können jedoch auch aus Laubholz gefertigt werden.

2.4 Einsetzbare Holzarten und -qualitäten

2.4.1 Allgemeines

Für den heutigen Wohnungsbau sind als Holzbauweisen für Vollgeschosse die genannten Bauweisen Holztafelbau und Massivholzbau typisch – beide werden üblicherweise als Fertigteilbauweisen genutzt. Weit seltener werden Skelettbauweisen ausgeführt. Für Dachgeschosse sind im Wohnungsbau weiterhin sowohl für Gebäude in Holzbauweise als auch für Gebäude in anderen Bauweisen Sparren- oder Pfettendächer oder Nagelplattenbinder typische Konstruktionen.

Der folgenden Abbildung 18 ist zu entnehmen, dass heutzutage etwa 80 bis 85 % des Holzbaus bei Ein- und Zweifamilienhäusern in Fertigteilbauweise erstellt werden, 15 bis 20 % in konventioneller (zimmermannsmäßiger) Holzbauweise. Weiterhin ist zu entnehmen, dass der Anteil des Holzbaus auch für Ein- und Zweifamilienhausbau insgesamt bei unter 20 % liegt. Steigerungsmöglichkeiten sind hier folglich vorhanden.

Abbildung 18: Genehmigungen von Eigenheimen nach Bauweisen

Jahr	Eigenheime insgesamt		Fertigteilbau insgesamt		Holzhausbau insgesamt		Holzhausbau Fertigteilbau		Holzhausbau konventionell**)	
	Gebäude	Anteil	Gebäude	Anteil	Gebäude	Anteil	Gebäude	Anteil*)	Gebäude	Anteil*)
1990	130.925	100	9.458	7,2	7.935	6,1	7.624	96,1	311	3,9
1991	120.895	100	9.790	8,1	8.375	6,9	8.048	96,1	326	3,9
1992	141.500	100	13.359	9,4	11.678	8,3	11.146	95,5	531	4,5
1993	170.692	100	17.924	10,5	15.510	9,1	14.916	96,2	594	3,8
1994	197.392	100	21.069	10,7	18.042	9,1	17.313	96,0	729	4,0
1995	167.587	100	20.297	12,1	17.822	10,6	17.054	95,7	768	4,3
1996	180.226	100	22.821	12,7	20.107	11,2	18.961	94,3	1.146	5,7
1997	194.685	100	27.715	14,2	25.480	13,1	23.197	91,0	2.283	9,0
1998	210.552	100	31.247	14,8	27.479	13,1	24.939	90,8	2.540	9,2
1999	215.740	100	31.918	14,8	27.843	12,9	25.083	90,1	2.760	9,9
2000	179.325	100	23.942	13,4	21.916	12,2	19.709	89,9	2.207	10,1
2001	154.608	100	20.383	13,2	19.600	12,7	17.526	89,4	2.074	10,6
2002	154.563	100	20.792	13,5	20.327	13,2	17.258	84,9	3.069	15,1
2003	174.049	100	22.737	13,1	22.471	12,9	18.892	84,1	3.579	15,9
2004	150.994	100	19.682	13,0	19.449	12,9	16.260	83,6	3.189	16,4
2005	133.421	100	18.177	13,6	18.335	13,7	15.435	84,2	2.900	15,8
2006	133.250	100	18.949	14,2	18.711	14,0	15.609	83,4	3.102	16,6
2007	86.707	100	12.721	14,7	12.281	14,2	10.151	82,7	2.130	17,3
2008	80.791	100	12.140	15,0	12.529	15,5	10.261	81,9	2.268	18,1
2009	82.445	100	12.007	14,6	12.857	15,6	10.432	81,1	2.425	18,9
2010	86.625	100	13.102	15,1	14.480	16,7	11.638	80,4	2.842	19,6
2011	102.639	100	15.484	15,1	16.893	16,5	13.814	81,8	3.079	18,2
2012	98.062	100	14.931	15,2	16.285	16,6	13.376	82,1	2.909	17,9

**) Eigenheime mit überwiegend verwendetem Baustoff Holz in konventioneller Bauweise (Ständerwerk und Massivbau) (Holzhausbau – Holzfertigteilbau)

*) Anteil am Holzbau insgesamt

Quelle: Pohl (2017): Betrachtungen zur Nachhaltigkeit der Holzbauweise im Wohnungsbau, LCEE Studie 2017, S. 64

Die Angaben des Statistischen Bundesamtes liefern analoge Erkenntnisse. Im Folgenden werden die Daten des Jahres 2017⁶ genutzt und ausgewertet. Eine Steigerung des Holzbaus wäre folglich

⁶ Statistisches Bundesamt (2018)

sowohl bei Ein- und Zweifamilienhäusern als auch bei Mehrfamilienhäusern möglich, wenn bei gleichem Bauvolumen andere Baustoffe substituiert werden. Die Auswirkungen eines Rückgangs dieser Baustoffe, wie beispielsweise Mauerwerk und Stahlbeton, sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

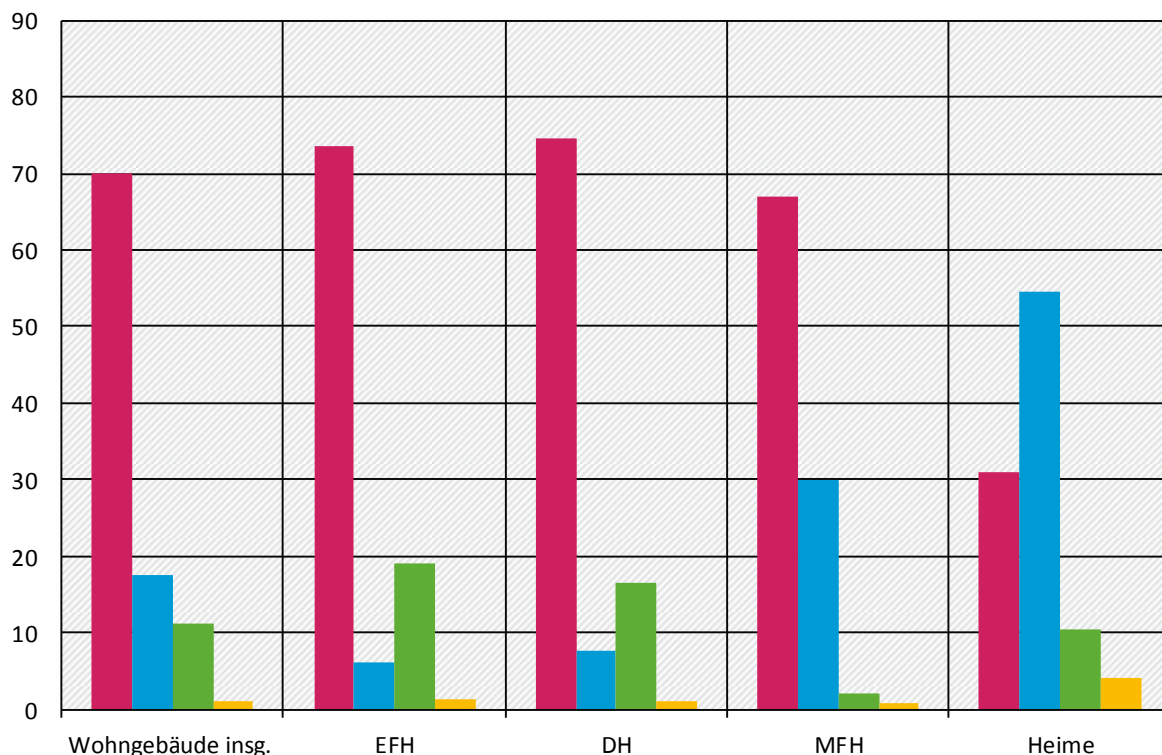
Tabelle 1: Fertigstellungen im Wohnungsbau nach Bauweisen (Stand 2017)

1000 m³ u.R.	Wohngebäude gesamt	EFH (1 Wohnung)	DH (2 Wohnungen)	MFH (3 und mehr Wohnungen)	Wohnheime
Mauerwerk (Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton, Leichtbeton)	113.155	54.580	9.825	47.937	813
Stahlbeton	28.359	4.569	1.003	21.364	1.423
Holz	18.151	14.131	2.174	1.574	272
Sonstige (inkl. Stahl)	1.825	979	150	590	106
alle Baustoffe	161.490	74.259	13.152	71.464	2.614

Daten: Statistisches Bundesamt (2018)

Abbildung 19: Fertigstellungen im Wohnungsbau nach Bauweisen (Stand 2017) – prozentual

Bauweisen im Wohnungsbau in %



■ Mauerwerk ■ Stahlbeton ■ Holz ■ Sonstige

Daten: Statistisches Bundesamt (2018)

In den vorherigen Kapiteln wurde gezeigt, welche Holzarten für welche Holzbauprodukte eingesetzt werden und in welchen Festigkeitsklassen bzw. technischen Klassen diese verfügbar sind. Zudem wurde erläutert, welche Holzbauprodukte bei den unterschiedlichen Holzbauweisen verwendet werden. Nun werden diese Angaben tabellarisch aufbereitet und um Zusammenstel-

lungen ergänzt, denen zu entnehmen ist, welche Holzarten somit bei welcher Holzbauweise verwendet werden (können). Tropenholz wird im Rahmen dieser Untersuchung aufgrund der geringen Relevanz (siehe auch Abbildung 6) nicht erfasst, sondern als Laubholz aus tropischen Regionen zu den sonstigen Laubhölzern gezählt.

Bei Nadelhölzern und Laubhölzern werden jeweils zwei Gruppen unterschieden:

- Nadelholzgruppe a: Kiefer, Lärche
- Nadelholzgruppe b: Fichte, Tanne, Douglasie, Sonstige
- Laubholzgruppe a: Eiche, Roteiche
- Laubholzgruppe b: Buche, Sonstige (hier mit Tropenholz)

In den erstellten Tabellen gilt: x: wird verwendet xx: wird hauptsächlich verwendet
 -: wird nicht verwendet (x): wird eingeschränkt verwendet

2.4.2 Holzarten für Holzbaustoffe und Holzwerkstoffe

Die folgenden Tabellen zeigen den Einsatz der Holzarten für die betrachteten Holzbau- und Holzwerkstoffe. Für Holzbaustoffe wird nahezu ausschließlich Nadelholz verwendet. Die meisten Holzbaustoffe werden dabei aus Fichtenholz hergestellt, je nach Region und zusätzlichen Anforderungen werden jedoch vor allem auch Tanne, Kiefer und Lärche genutzt. Als Laubholz kommen für Holzbaustoffe derzeit nur Eiche und Buche zum Einsatz.

Tabelle 2: Einsatz von Holzarten bei den betrachteten Holzbaustoffen

Holzart	Vollholz	Konstruktionsvollholz	Balkenschichtholz	Brettschichtholz
Nadelholz				
a: Kiefer, Lärche	x	x	x	x
b: Fichte, Tanne, Douglasie, Sonstige	x	xx (Fichte) / x	xx (Fichte) / x	xx (Fichte) / x
Laubholz				
a: Eiche, Roteiche	x	-	-	x
b: Buche, Sonstige	x	-	-	x
Tropenholz*				
Holzart	Brettsperrholz	Brettstapelholz	Massivholzplatten	BauBuche
Nadelholz				
a: Kiefer, Lärche	x	x	x	-
b: Fichte, Tanne, Douglasie, Sonstige	x	x	x	-
Laubholz				
a: Eiche, Roteiche	-	-	x (Möbel)	-
b: Buche, Sonstige	x	-	x (Möbel)	x
Tropenholz*				

*nicht gesondert erfasst, als tragendes Bauteil unüblich, werden als Laubhölzer zu Sonstigen Laubhölzern gezählt

Die Vollholzprodukte Vollholz, Konstruktionsvollholz, Balkenschichtholz und Brettschichtholz sind in Festigkeitsklassen eingeteilt. Damit können alle in die entsprechenden Sortier- bzw. Festigkeitsklassen sortierten Holzarten eingesetzt werden.

Für Holzwerkstoffe werden ebenfalls zum großen Teil Nadelhölzer eingesetzt. Vor allem bei Furnierschichtholz und Sperrholz wird jedoch auch viel Buchenholz verwendet. Bei Spanplatten und Faserplatten werden Holzreste, Altholz oder aus Holzstämmen erstellte Hackschnitzel genutzt, bei denen nicht nach Laub- und Nadelholz unterschieden werden müsste. Aufgrund des im Bauwesen überwiegend eingesetzten Nadelholzes (siehe auch Abbildung 6) bestehen jedoch auch Holzreste zum großen Teil aus Nadelholz. Die Hersteller haben über Zulassungen geregelte „Rezepte“, nach denen die Holzwerkstoffplatten erstellt werden, welche für eine Laubholznutzung angepasst werden müssten. Aufgrund der derzeitigen Angebots- und Preislage wird herstellerseitig (noch) keine Veranlassung gesehen, entsprechende Anpassungen vorzunehmen.

Tabelle 3: Einsatz von Holzarten bei den betrachteten Holzwerkstoffen

Holzart	Furnierschichtholz	(Furnier)Sperrholz	Spanplatten	Faserplatten	OSB-Platten
Nadelholz					
a: Kiefer, Lärche	x	x	x	x	x
b: Fichte, Tanne, Douglasie, Sonstige	x	x	x	x	x
Laubholz					
a: Eiche, Roteiche	-	-	-	-	-
b: Buche, Sonstige	x	x	-	-	x (Pappel)
Tropenholz*					

*nicht gesondert erfasst, als tragendes Bauteil unüblich, werden als Laubhölzer zu Sonstigen Laubhölzern gezählt

In einigen Fällen wird der derzeitige Einsatz von Laubholz im Holzbau lediglich durch die Verfügbarkeit und die höheren Kosten eingeschränkt. In vielen weiteren Fällen müssen „nur“ noch rechtliche Grundlagen geschaffen werden, um Laubholzprodukte geregelt einsetzen zu können. Für diverse Holzbauprodukte sind jedoch auch noch weitere Untersuchungen erforderlich, um entsprechende Technologieanpassungen bei Herstellung und Verklebung vornehmen zu können. Während bei den Vollhölzern vor allem die zum Teil deutliche Krümmfähigkeit und die damit einhergehende begrenzte Länge gerader Bauteile sowie bei kleineren Sägewerken zum Teil auch die meist größeren Stammdurchmesser, die nicht überall verarbeitet werden können, als Einschränkung gesehen werden, sind bei den übrigen Holzbau- und Holzwerkstoffen auch die zeit- und kostenintensive Trocknung, die zum Teil größeren Quell- und Schwindbeiwerte (die beim Trocknen zu Querschnittsverzerrungen oder Verdrehungen führen können), die Verklebung (Wahl geeigneter Klebstoffe, Klebstoffdicken, -auftrag etc.) und Keilzinkung sowie die Herstelltechnologie selbst noch näher zu untersuchen. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf. Zudem ist die genannte aufwändigere Montage (hinsichtlich Gewicht und zusätzlicher Arbeitsschritte bei stiftförmigen Verbindungsmitteln) zu beachten. Nachfolgend wird eine kurze Einschätzung bezüglich des zukünftig möglichen Einsatzes von Laubholz gegeben.

- ▶ **VH:** Buchen- und Eichenvollholz ist normativ geregelt und kann somit bemessen und eingesetzt werden. Die sich gegenüber Nadelholz unterscheidenden Eigenschaften müssen natürlich bei der Planung beachtet werden. Von Vorteil sind die deutlich höheren Festigkeiten der Laubhölzer, nachteilig wirken sich hingegen die höhere Dichte (größeres Gewicht; Vorbohren bei Verbindungen erforderlich) und das teilweise ungünstigere Quell- und Schwindverhalten aus. Der Einsatz anderer Laubhölzer ist ebenso denkbar. Hindernis scheinen derzeit eher die Verfügbarkeit und die höheren Kosten zu sein. Europäisch werden bereits weitere Laubhölzer eingesetzt.
- ▶ **KVH:** Keilgezinktes Vollholz aus Laubholz ist derzeit noch nicht geregelt. Hier sind vor allem noch das Trocknungsverhalten der Laubhölzer sowie Klebstofftechnologien zu untersuchen.

Letztere wurden bereits im Zuge der Brettschichtholzzulassungen betrachtet, so dass hier keine weiteren Schwierigkeiten gesehen werden. Die Trocknung von Laubholzvollquerschnitten ist jedoch aufgrund der (gegenüber Brettschichtholzlamellen) größeren Querschnitte derzeit noch nicht zufriedenstellend geklärt, neben des hohen Zeitbedarfs (und der daher höheren Kosten) treten aufgrund der größeren Schwindbeiwerte häufig auch unerwünschte Verformungen auf.

- ▶ **BSH:** Brettschichtholz aus Buche- oder Eichelamellen ist in Zulassungen geregelt und somit verwendbar. Brettschichtholz aus anderen Laubhölzern ist ebenso denkbar. In der Schweiz ist bereits Brettschichtholz aus Esche einsetzbar. Grundsätzlich verfügbar, jedoch derzeit nur über eine ZiE einsetzbar, sind auch Brettschichthölzer aus Birke, Kastanie, Eukalyptus und Pappel.⁷
- ▶ **BaSH:** Balkenschichtholz aus Laubholz ist derzeit noch nicht geregelt. Technologische oder eigenschaftsbedingte Hinderungsgründe werden hier jedoch nicht gesehen, da Balkenschichtholz als eine Art Zwischenprodukt zwischen KVH und BSH betrachtet werden kann.
- ▶ **BSP:** Brettsperrholz ist als Laubholzprodukt derzeit nur in Birke verfügbar und kann nur über eine ZiE verwendet werden. Der Einsatz weiterer Laubholzarten ist jedoch denkbar, sobald Trocknungsverhalten und Klebstofftechnologie ausreichend untersucht sind (s. Hinweise bei KVH und BSH).
- ▶ **B-StapelH:** Brettstapelholz könnte bereits mit den geregelten Vollholzprodukten Eiche und Buche hergestellt werden, wenn die Besonderheiten bezüglich der Verbindungen betrachtet werden. Die genannten Punkte Trocknung und Verklebung sowie Vorbohren von Verbindungen stellen die derzeitigen Schwierigkeiten dar.
- ▶ **FSH:** Furnierschichtholz aus Buche ist in Zulassungen geregelt und somit einsetzbar. Der Einsatz weiterer Laubhölzer ist grundsätzlich denkbar, aufgrund des Schälens sind jedoch nur sehr gerade Stämme nutzbar. Wegen der oft vorliegenden Krummschäftigkeit von Laubhölzern müssten hier Technologieanpassungen untersucht werden, sodass beispielsweise mit kurzen Stammteilen gearbeitet werden könnte. Zumindest die für Furniersperrholz bereits eingesetzten weiteren Holzarten Birke und Pappel dürften wegen des analogen Herstellverfahrens keine Schwierigkeiten bereiten. Für weitere Holzarten ist neben der Schältechnologie auch die Verklebung zu untersuchen.
- ▶ **FU:** Furniersperrholz ist derzeit bereits aus Birke, Buche (FU-BU) und Pappel verfügbar und normativ bzw. über Zulassungen geregelt. Für den Einsatz weiterer Nadelhölzer gilt oben unter FSH Genanntes.
- ▶ **Spanplatten** werden aus Spänen, holzartigen Faserstoffen und Altholz gefertigt. Ein Einsatz von Laubhölzern wäre hier grundsätzlich möglich, wenn diese Ausgangsstoffe in ausreichender Menge zur Verfügung stehen (sobald mehr Laubholz verarbeitet und verbaut wird, werden beispielsweise mehr Sägewerksabfälle aus Laubholz zur Verfügung stehen) und die Technologie ausreichend untersucht ist (Herstellung, Bindemittleinsatz).
- ▶ **Faserplatten** werden aus zerkleinerten Holzhackschnitzeln gefertigt, welche aufgeschlossen und zerfasert werden, sodass unter Berücksichtigung des oben unter Spanplatten Genanntes ein Einsatz von Laubhölzern ebenfalls grundsätzlich möglich wäre. Auch hier sind vor allem noch Untersuchungen hinsichtlich der Technologieanpassung auf Laubholz erforderlich.

⁷ Torno et al. (2017)

- **OSB-Platten** aus Laubholz sind derzeit nur in Pappel verfügbar. Wegen des kleinteiligen Holzeinsatzes ist jedoch auch hier der Einsatz weiterer Laubhölzer grundsätzlich möglich.

Werden Tabelle 2 und Tabelle 3 um die grundsätzliche Möglichkeit eines Einsatzes von Laubholz ergänzt – mit dem Buchstaben o in den entsprechenden Feldern –, ergibt sich folgende Übersicht.

Tabelle 4: Einsatz von Holzarten bei den betrachteten Holzbaustoffen

Holzart	Vollholz	Konstruktionsvollholz	Balkenschichtholz	Brettschichtholz
Nadelholz				
a: Kiefer, Lärche	x	x	x	x
b: Fichte, Tanne, Douglasie, Sonstige	x	xx (Fichte) / x	xx (Fichte) / x	xx (Fichte) / x
Laubholz				
a: Eiche, Roteiche	x	o	o	x
b: Buche, Sonstige	x	o	o	x
Tropenholz*				

Holzart	Brettsperrholz	Brettstapelholz	Massivholzplatten	BauBuche
Nadelholz				
a: Kiefer, Lärche	x	x	x	-
b: Fichte, Tanne, Douglasie, Sonstige	x	x	x	-
Laubholz				
a: Eiche, Roteiche	o	o	x	-
b: Buche, Sonstige	x	o	x	x
Tropenholz*				

*nicht gesondert erfasst, als tragendes Bauteil unüblich, werden als Laubhölzer zu Sonstigen Laubhölzern gezählt

Tabelle 5: Einsatz von Holzarten bei den betrachteten Holzwerkstoffen

Holzart	Furnierschichtholz	(Furnier)Sperrholz	Spanplatten	Faserplatten	OSB-Platten
Nadelholz					
a: Kiefer, Lärche	x	x	x	x	x
b: Fichte, Tanne, Douglasie, Sonstige	x	x	x	x	x
Laubholz					
a: Eiche, Roteiche	o	o	o	o	o
b: Buche, Sonstige	x	x	o	o	x
Tropenholz*					

*nicht gesondert erfasst, als tragendes Bauteil unüblich, werden als Laubhölzer zu Sonstigen Laubhölzern gezählt

Nadelhölzer in niedrigen Sortier- bzw. Festigkeitsklassen (S7, C16) werden als Holzbaustoffe nur für untergeordnete Bauten bzw. Bauteile mit geringen Anforderungen genutzt. Standardmäßig werden Nadelhölzer der Sortier- bzw. Festigkeitsklasse S10, C24 verwendet. Höhere Sortier- bzw. Festigkeitsklassen (S13, C30) werden bei höheren Anforderungen eingesetzt und vor allem auch für Brettschichtholz höherer Festigkeit genutzt. Für Laubhölzer gilt Ähnliches, jedoch sind die Festigkeiten ohnehin höher, sodass ein Einsatz für Bauteile und Bauweisen mit hohen Anforderungen grundsätzlich möglich ist.

Die folgende Tabelle zeigt beispielhaft die normative Einstufung verschiedener Holzarten in Festigkeits- bzw. Sortierklassen und gibt damit eine Übersicht, welche Holzarten in welchen Qualitäten verfügbar sind. Dabei wird nochmal deutlich, dass Laubhölzer höhere charakteristische Festigkeiten aufweisen als Nadelhölzer. Die qualitativ hochwertigsten in Deutschland verfügbaren Nadelhölzer erreichen mit Biegefestigkeiten von 30-35 N/mm² nur die charakteristischen Biegefestigkeiten der qualitativ niedrigsten Laubhölzer. Bezüglich der visuellen Sortierkriterien sind die Unterschiede jedoch weniger ausgeprägt, sodass mit Ausnahme der niedrigsten Sortierklasse S7 ähnliche Anforderungen bezüglich Ästigkeit, Trocknungsrisse, Baumkanten, Faserneigung etc. gestellt werden und somit gleichwertige Qualitäten vorliegen.

Tabelle 6: Verfügbarkeit von Holzqualitäten bei Laub- und Nadelhölzern

Holzart	Festigkeitsklasse												
Nadelholz	C14	C16	C18	C20	C22	C24	C27	C30	C35				
Laubholz								D30	D35	D40	D50	D60	D70
Holzart (Deutschland)	Sortierklasse												
Fichte, Kiefer, Tanne, Lärche		S7*	S7*			S10		S13					
Douglasie		S7				S10			S13				
Eiche								LS10+					
Buche									LS10+	LS13			
Esche										LS10+			
Ahorn								LS10+					
Pappel					LS10+		LS13						
Weitere Holzarten (beispielhaft)	europäisch (inkl. USA, Kanada) verfügbar in Festigkeitsklassen												
Hemlocktanne	x	x	x	x		x							
Rotzeder	x		x										
Strandkiefer			x			x							
Fichte, Kiefer, Tanne, Lärche	x	x	x	x	(x)	x	(x)	x					
Douglasie	x	x	x	x		x							
Pappel (als NH klassifiziert)			x			x							
Eukalyptus										x			
Teak										x			
Balau/Bangkirai											x		
Azobé													x

*Fichte, Kiefer: C18 | Tanne, Lärche: C16

Daten: zusammengestellt aus DIN EN 1912:2012+AC:2013

Eine darüberhinausgehende Aussage, welche Holzqualitäten für welche Bauweisen eingesetzt werden können, ist aufgrund der Datenlage jedoch kaum möglich.

Tendenziell steigen die Anforderungen an das eingesetzte Holz mit der Größe der Holzbauteile. So können für Vollholzträger mit hohen Anforderungen nur Träger der entsprechend höheren Festigkeits- bzw. Sortierklassen eingesetzt werden. Daraus lässt sich rückschließen, dass im Holzskelettbau beispielsweise keine Holzarten geringer Qualität eingesetzt werden können. Auf der anderen Seite spielt die Holzqualität des Ausgangsproduktes für die Erstellung von Holzwerkstoffen kaum eine Rolle, da geringe Holzfestigkeiten vor allem aus Fehlstellen bzw. Ästen, Faserneigung und Rissen resultieren, die auf Späne und Fasern jedoch keinen Einfluss haben und auch bei Furnierschichthölzern oder -sperrhölzern durch die Verwendung vieler dünner Schichten übereinander (bei denen somit die Wahrscheinlichkeit, dass sämtliche Fehlstellen an einem Ort zusammentreffen, gering ist) nur von untergeordnetem Einfluss sind. Für Holzwerk-

stoffe und somit auch für holzwerkstoffbasierte Holzbauweisen wie den Holztafelbau sind somit geringere Holzqualitäten einsetzbar. Brettschichtholzbauweisen stellen zwar hohe Anforderungen an die Brettschichtholzbauteile, bestehen jedoch aus einzelnen keilgezinkten Lamellen, bei denen Fehlstellen herausgeschnitten werden können und die weit geringere Querschnitte aufweisen als der Träger selbst, sodass die Anforderungen an das eingesetzte Holz selbst geringer sind. Als Lamellenfestigkeit muss jedoch mindestens C24 vorliegen.

2.4.3 Holzbaustoffe und Holzwerkstoffe für die betrachteten Holzbauweisen

Die folgenden Tabellen zeigen den Einsatz der Holzbau- und Holzwerkstoffe für die betrachteten Holzbauweisen.

Plattenförmige Holzbauprodukte werden für stabförmige Holzbauweisen wie Holzskelettbau, Steildachkonstruktionen, Nagelplattenbinder und Hallenbinder nur für Bekleidungen oder Aussteifungen genutzt. Stabförmige Holzbauprodukte werden hingegen nur für stabförmige Holzbauweisen genutzt und treten somit bei flächigen Holzbauweisen wie dem Massivholzbau nur für integrierte stabförmige Bauteile wie Unterzüge und Stützen auf.

Der Holztafelbau weist als tragende Elemente sowohl stabförmige als auch plattenförmige Einzelelemente auf, sodass hier beide Arten von Holzbauprodukten Verwendung finden. Für den Holzbetonverbundbau gilt Ähnliches, da die Holzelemente sowohl als Balken- als auch als Plattenelemente eingesetzt werden. Bei Hallenbindern ist hinsichtlich des Produkteinsatzes zwischen Fachwerkbindern (FW) und Brettschichtholzbindern (BSH) zu unterscheiden.

Tabelle 7: Einsatz von Holzbaustoffen bei den betrachteten Holzbauweisen

Holzbauweise	Vollholz	Konstruktionsvollholz	Balkenschichtholz	Brettschichtholz
Holztafelbau *	x	xx	x	x
Holzskelettbau	(x)	xx	x	xx
Holzsteildachkonstruktionen	xx	xx	(x)	x
Nagelplattenbinder	xx	x	x	x
Massivholzbau	-	(x)	(x)	(x)
Holzbetonverbundbau	-	xx	x	xx
Hallenbinder	xx (FW)	xx (FW)	(x)	xx (BSH)

Holzbauweise	Brettsperrholz	Brettstapelholz	Massivholzplatten	BauBuche
Holztafelbau *	-	-	-	(x)
Holzskelettbau	(x) / -	(x) / -	(x) / -	(x)
Holzsteildachkonstruktionen	-	-	-	(x)
Nagelplattenbinder	-	-	-	-
Massivholzbau	xx	xx	xx	(x)
Holzbetonverbundbau	(x)	xx	(x)	-
Hallenbinder	-	-	-	x (BSH)

*Baustoffe für Rippen, Rähme, Schwellen (stabförmige Bauteile) | (x) / -: nur für Aussteifungselemente, nicht für die eigentliche Holzskelettkonstruktion

Tabelle 8: Einsatz von Holzwerkstoffen bei den betrachteten Holzbauweisen

Holzbauweise	Furnierschichtholz	(Furnier)Sperrholz	Spanplatten	Faserplatten	OSB-Platten
Holztafelbau *	xx	xx	x	x	xx
Holzskelettbau	(x)	(x) / -	(x) / -	(x) / -	(x) / -
Holzsteildachkonstruktionen	(x) / -	(x) / -	(x) / -	(x) / -	(x) / -
Nagelplattenbinder	(x) / -	(x) / -	(x) / -	(x) / -	(x) / -
Massivholzbau	x	(x) / -	(x) / -	(x) / -	(x) / -
Holzbetonverbundbau	(x)	-	-	-	-
Hallenbinder	(x)	(x) / -	(x) / -	(x) / -	(x) / -

*: Baustoffe für Beplankung (plattenförmige Bauteile) | (x) / -: nur für Bekleidungen, ggf. für Aussteifungselemente, nicht für die eigentliche Tragkonstruktion

2.4.4 Zusammenfassung

Unter Berücksichtigung des vorgenannten Einsatzes von Holzarten für Holzbauprodukte sowie von Holzbauprodukten für Holzbauweisen lässt sich angeben, welche Holzarten für welche Holzbauweisen verwendet werden. Dies ist in den folgenden Tabellen zusammengefasst.

Tabelle 9: Einsatz von Holzbaustoffen und Holzarten bei den betrachteten Holzbauweisen

Holzbauweise	VH / KVH		BaSH / BSH		BSP / B-StapelH		BauBuche	
	LH	NH	LH	NH	LH	NH	LH	NH
Holztafelbau	x	xx	(x)	xx	-	-	(x)	-
Holzskelettbau	x	xx	(x)	xx	(x)	(x)	(x)	-
Holzsteildachkonstruktionen	x	xx	(x)	x	-	-	(x)	-
Nagelplattenbinder	-	xx	-	x	-	-	-	-
Massivholzbau	(x)	(x)	(x)	x	x	xx	(x)	-
Holzbetonverbundbau	-	x	-	xx	-	xx	-	-
Hallenbinder	x	x	x	xx	-	-	x	-

Tabelle 10: Einsatz von Holzwerkstoffen und Holzarten bei den betrachteten Holzbauweisen

Holzbauweise	FSH / FU		Spanplatten		Faserplatten		OSB-Platten	
	LH	NH	LH	NH	LH	NH	LH	NH
Holztafelbau	x	xx	(x)	x	(x)	x	x	xx
Holzskelettbau	(x)	(x)	-	-	-	-	-	-
Holzsteildachkonstruktionen	-	-	-	-	-	-	-	-
Nagelplattenbinder	-	-	-	-	-	-	-	-
Massivholzbau	(x)	(x)	-	-	-	-	-	-
Holzbetonverbundbau	-	(x)	-	-	-	-	-	-
Hallenbinder	(x)	(x)	-	-	-	-	-	-

Dabei wird nochmal deutlich, dass als Baustoff im Holzbau zur Zeit überwiegend Nadelhölzer eingesetzt werden.

Laubhölzer werden teilweise als stabförmige Bauteile (Vollholz und Brettschichtholz sowie BauBuche) bei Hallenbindern und im Holzskelettbau genutzt. Im Holztafelbau, bei Steildächern und im Massivholzbau können sie ebenfalls eingesetzt werden. Als plattenförmige Bauteile (vor allem Brettsperrholz, Furnierschichtholz und -sperrholz, jedoch auch Spanplatten, Faserplatten und OSB-Platten) könnten Laubhölzer vor allem im Holztafelbau sowie als (nichttragende) Bekleidung beispielsweise bei Dachkonstruktionen oder Holzbalkendecken eingesetzt werden, sie könnten jedoch auch im Massivholzbau verwendet werden. Hier sind teilweise weitere Untersuchungen erforderlich, bevor die entsprechenden Laubholzprodukte geregelt einsetzbar sind (siehe Kap. 2.4.3). Ein Einsatz im Holzbetonverbundbau ist aufgrund der gesonderten Verbindungsmittel zur Erzielung des Verbundes zwischen Holz und Beton wahrscheinlich in den nächsten Jahren noch nicht möglich, jedoch grundsätzlich denkbar. Ein Einsatz bei Nagelplattenbindern wird hingegen als eher unrealistisch eingeschätzt, solange Laubhölzer nicht preislich günstiger zu beziehen sind als Nadelhölzer.

Zu bedenken ist, dass die heutige Holzindustrie noch auf einfach zu verarbeitende, gerade, lange Stämme der bisherigen Fichten- und Kiefernwälder ausgelegt ist. Mit dem seit etwa einem Vierteljahrhundert andauernden Waldumbau haben bereits Technologieanpassungen begonnen, die noch fortzuführen sind. Für zahlreiche Holzbauprodukte und Holzbauweisen sind zudem noch weitere Untersuchungen erforderlich, bevor diese auch in Laubholz bauaufsichtlich geregelt eingesetzt werden können.

3 National verfügbare Hölzer (AP 1.2)

Dieses Kapitel behandelt die Fragestellung, wie groß das Potenzial des national verfügbaren Holzes ist und wie sich die regionale Verteilung innerhalb Deutschlands darstellt.

Als Ausgangsbasis wird hierfür zunächst der aktuelle statistisch erfasste Holzeinschlag Deutschlands nach Holzarten, Holzsorten und Bundesländern ausgewertet. Hierdurch wird ein Überblick über die derzeitige Waldnutzung und damit das aktuell genutzte Holzpotenzial geschaffen. Dabei wird auch auf die Mängel der statistischen Erfassung eingegangen.

In einem zweiten Schritt werden die Entwicklung des Holzvorrats und des Rohholzpotenzials in Deutschland bis zum Jahr 2052 und die zur Berechnung dieser Daten erarbeiteten Waldmodelle vorgestellt. Damit können Aussagen zum zukünftigen Potenzial an national verfügbaren Hölzern getroffen werden. Darüber hinaus wird die regionale Verteilung des Rohholzpotenzials dargestellt.

Abschließend werden die Daten zum zukünftigen Potenzial den Volumina der Holzverwendung gegenübergestellt, um so Aussagen ableiten zu können, in welchem Umfang das nationale Potenzial den nationalen Bedarf zukünftig zu decken vermag.

3.1 Holzeinschlag in Deutschland 2017

Die im Folgenden aufgeführten Angaben zum Rohholzaufkommen in Deutschland wurden der Holzeinschlagsstatistik 2017 des Statistischen Bundesamts entnommen. Das eingeschlagene Rohholz wird in Festmeter Derbholz ohne Rinde erhoben und forstüblich als Erntefestmeter Derbholz ohne Rinde (EfmD o. R. in m³) bezeichnet.⁸

Der Holzeinschlagsstatistik liegt eine Kombination verschiedener Erhebungsverfahren und Methoden zugrunde. Neben sekundärstatistisch gewonnenen Daten aus den staatlichen Forstverwaltungen werden forstliche Erzeugerbetriebe direkt befragt und Schätzungen vorgenommen.⁹

Zu beachten ist, dass der Holzeinschlag nicht mit der Waldholzentnahme gleichzusetzen ist, da gefällttes Holz teilweise im Wald verbleibt. Dies sind vom eingeschlagenen Derbholz derzeit etwa 4 % beim Nadelholz und etwa 8 % beim Laubholz. Zugleich wird auch Nicht-Derbholz (ausschließlich energetisch) genutzt und vergrößert somit die Waldholzentnahme, ohne in der amtlichen Statistik abgebildet zu werden.¹⁰

3.1.1 Holzeinschlag nach Holzartengruppen

In Tabelle 11 ist der für das Jahr 2017 statistisch ausgewiesene gesamte Derbholzeinschlag nach Holzartengruppen (HAG) und Bundesländern angegeben. Die Gruppe der Nadelhölzer wird dabei unterschieden in die Gruppe Kiefer und Lärche sowie die Gruppe Fichte, Tanne, Douglasie und sonstiges Nadelholz (NH). Beim Laubholz wird differenziert nach den Gruppen Eiche und Roteiche sowie Buche und sonstiges Laubholz (LH). Insgesamt wurde im Jahr 2017 in Deutschland ein Rohholzeinschlag von etwa 53,5 Mio. Erntefestmeter ohne Rinde erfasst. Etwa drei Viertel davon entfielen auf Nadelhölzer und entsprechend etwa ein Viertel auf Laubhölzer. Den größten Anteil am Nadelholzeinschlag lieferte mit knapp 71 % die Holzartengruppe Fichte, Tanne, Douglasie und sonstiges Nadelholz, die damit wichtigster Holzlieferant Deutschlands ist. Wichtigster Laubholzlieferant war mit knapp 85 % die Holzartengruppe Buche und sonstiges Laubholz.

⁸ Statistisches Bundesamt (2018)

⁹ Statistisches Bundesamt (2018)

¹⁰ Vgl. FNR (2018b)

Tabelle 11: Gesamtholzeinschlag 2017 nach Holzartengruppen und Ländern

in 1.000 m³ (ohne Rinde)

Land	Insgesamt	Davon			
		Eiche und Roteiche	Buche und sonst. Laubholz	Kiefer und Lärche	Fichte, Tanne, Douglasie und sonst. NH
Deutschland	53.490,7	1.947,7	10.648,6	12.016,5	28.877,9
Baden-Württemberg	8.332,4	216,3	2.330,3	385,0	5.400,7
Bayern	17.853,4	349,6	2.298,8	2.513,8	12.691,3
Berlin *	54,2	5,8	6,5	41,1	0,9
Brandenburg	4.270,1	163,1	310,9	3.602,3	193,8
Hamburg	6,3	0,4	1,7	1,3	2,9
Hessen	4.414,5	234,6	1.570,2	685,1	1.924,6
Mecklenburg-Vorp.	1.763,9	87,4	441,3	900,9	334,4
Niedersachsen	3.859,2	187,7	819,8	1.380,8	1.470,9
Nordrhein-Westfalen	3.017,3	208,2	685,3	310,7	1.813,1
Rheinland-Pfalz	3.263,5	226,6	885,6	404,9	1.746,3
Saarland	324,2	38,6	124,1	30,3	131,3
Sachsen	1.489,5	29,1	118,3	343,0	999,1
Sachsen-Anhalt	1.454,5	82,4	196,8	842,8	332,5
Schleswig-Holstein	588,5	35,0	175,6	119,2	258,7
Thüringen	2.799,5	82,9	683,6	455,5	1.577,4

* Die Angaben umfassen nur den Bestand der Berliner Forsten (=Landeswald).

Daten: Statistisches Bundesamt (2018)

Tabelle 12 zeigt die Anteile der verschiedenen Waldeigentumsarten am Holzeinschlag und die jeweiligen Anteile der Holzartengruppen. Mit 45 % wurde fast die Hälfte des erfassten Holzeinschlags in Wäldern in Privatbesitz erbracht.¹¹ Bei den öffentlichen/staatlichen Waldbesitzerguppen entfielen 22 % des Holzeinschlags auf die Körperschaften und 20 % auf die Länder. Der Bund wies einen Holzeinschlagsanteil von nur 2 % auf.

Die Holzartenanteile variieren etwas je nach Eigentumskategorie. In allen Eigentumsgruppen dominiert der Nadelholzeinschlag, wobei der Privatwald über die größten Nadelholzanteile verfügt. Der Körperschaftswald verfügt hingegen relativ über die größten Laubholzanteile.

¹¹ Vermutlich ist der Anteil des Holzeinschlags im Privatwald anteilig noch größer, weil davon ausgegangen wird, dass der private Holzeinschlag nicht vollständig statistisch erfasst wird (siehe hierzu Kapitel 3.1.3).

Tabelle 12: Gesamtholzeinschlag 2017 nach Holzartengruppen und Waldeigentumsarten

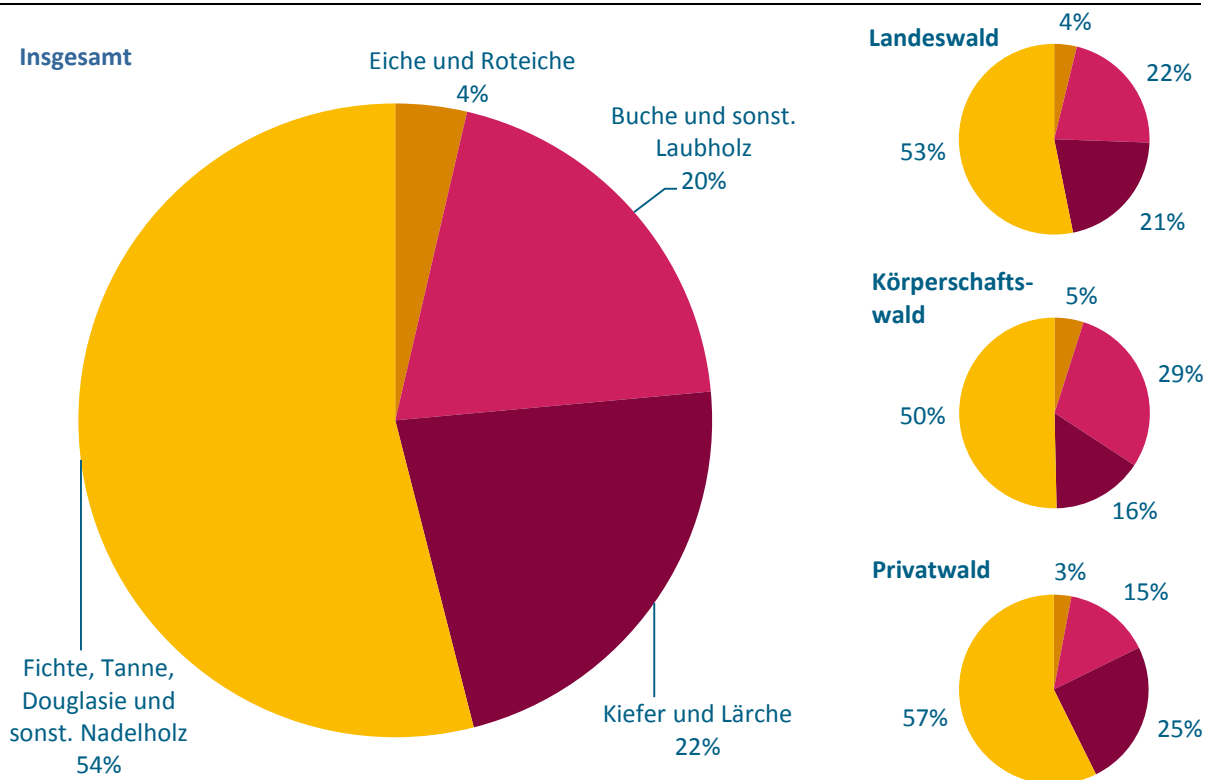
in 1.000 m³ (ohne Rinde)

Waldeigentumsart	Insgesamt	Davon			
		Eiche und Roteiche	Buche und sonstiges Laubholz	Kiefer und Lärche	Fichte, Tanne, Douglasie und sonstiges NH
Insgesamt	53.490,7	1.947,7	10.648,6	12.016,5	28.877,9
Bundeswald	941,2	20,2	118,9	575,7	226,4
Landeswald	17.863,8	684,2	3.882,2	3.798,1	9.499,3
Körperschaftswald	10.557,6	521,6	3.091,5	1.629,4	5.315,1
Privatwald	24.128,2	721,7	3.556,0	6.013,3	13.837,1

Daten: Statistisches Bundesamt (2018)

Die jeweiligen Anteile der Holzarten am Holzeinschlag sind in Abbildung 20 dargestellt. Dort wird auch abgebildet, wie sich die Anteile je nach Waldeigentümergruppe unterscheiden. Im Privatwald wird gegenüber dem Wald mit öffentlich-rechtlichen Besitzern anteilig mehr Nadelholz geschlagen. Auf das Ausweisen der Anteile im Bundeswald wird aufgrund der vergleichsweise geringen Holzeinschlagsmenge verzichtet.

Abbildung 20: Anteile der Holzarten am Holzeinschlag, 2017

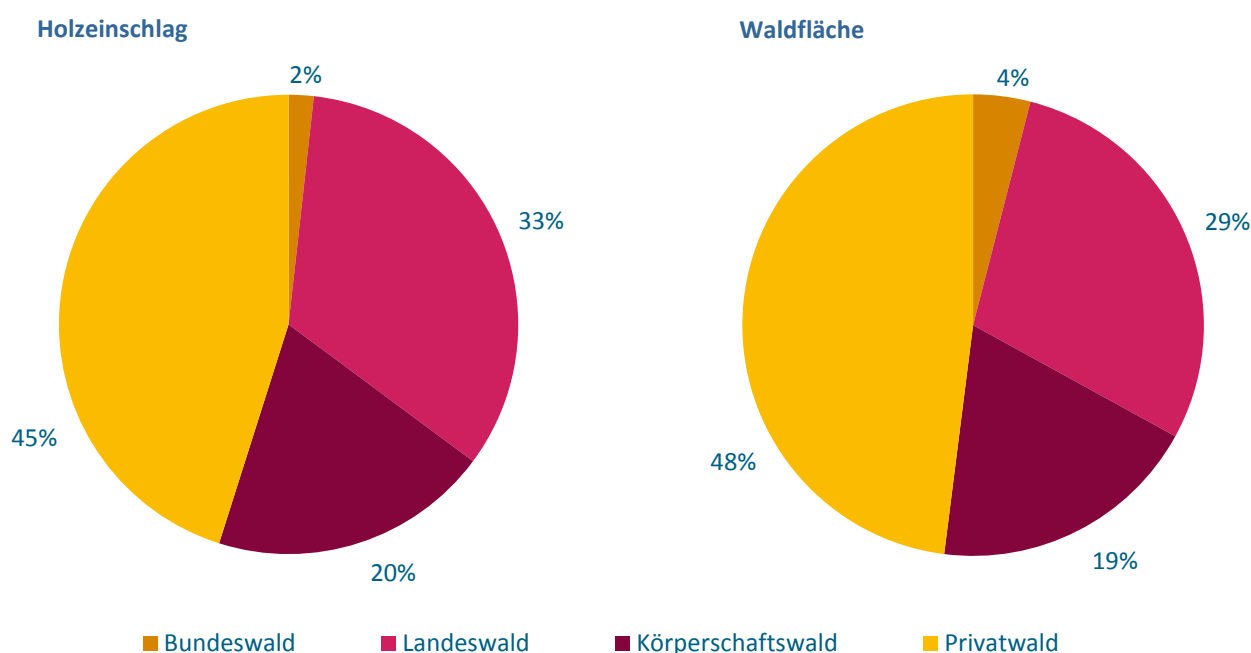


Daten: Statistisches Bundesamt (2018)

In Abbildung 21 wird neben den Anteilen des Holzeinschlags zum Vergleich auch die Waldbesitzstruktur in Deutschland dargestellt, wie sie in der dritten Bundeswaldinventur 2012 erhoben wurde. Der Wald befindet sich demnach mit 48 % fast zur Hälfte in privatem Besitz. Zweitgrößter Besitzer sind mit ca. 29 % die Länder, gefolgt von den Körperschaften mit 19 %. Der Bund verfügt mit 4 % lediglich über einen sehr geringen Waldflächenanteil.

Im Vergleich zu dem anteiligen Holzeinschlag zeigt sich, dass in Bezug zur Fläche überproportional viel Holz in den Wäldern der Länder und Körperschaften geschlagen wurde. Diese Zahlen resultieren sicherlich zumindest teilweise aus der unvollständigen statistischen Erfassung des Holzeinschlags in Privatwäldern (siehe hierzu Kapitel 3.1.3). Weitere Ursachen wie eine höhere Nutzungsintensität in den Wäldern der Länder und Körperschaften sind denkbar.

Abbildung 21: Anteile der verschiedenen Waldeigentümergruppen an Holzeinschlag und Waldfläche

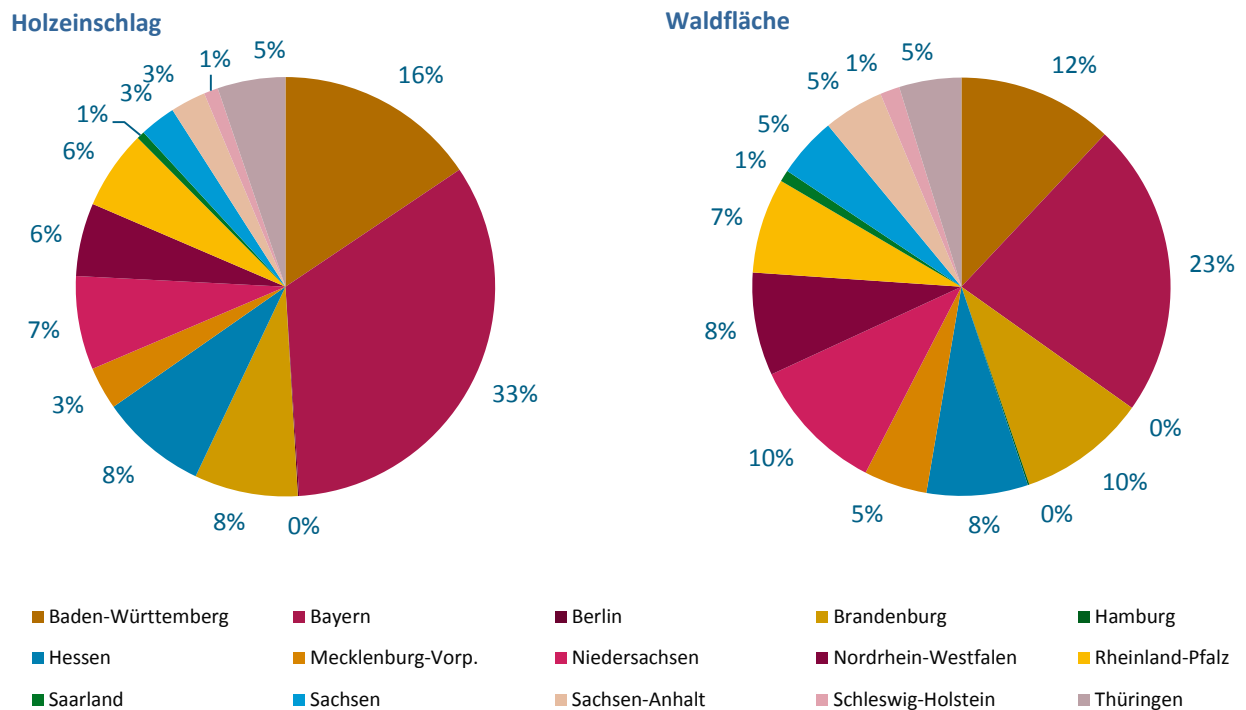


Daten: Statistisches Bundesamt (2018) und BMEL (2016a)

Zur regionalen Verteilung des erfassten Rohholzeinschlags und den Anteilen der Bundesländer an den Waldflächen Deutschlands gibt Abbildung 22 Auskunft. Hiernach wurde etwa die Hälfte der Rohholzmenge im Süden Deutschlands in den Bundesländern Bayern und Baden-Württemberg geschlagen, obwohl diese Bundesländer nur über etwas mehr als ein Drittel der deutschen Waldfläche verfügen. Allein ein Drittel des Holzeinschlags wurde in Bayern erfasst, bei einem Waldanteil von einem knappen Viertel der Gesamtfläche Deutschlands. Die in den anderen Bundesländern erfasste Holzeinschlagsmenge ist jeweils proportional oder unterproportional zur Waldfläche.

Ursächlich für die unterschiedlich intensive Waldnutzung könnten die verschiedenen Wald- und Eigentümerstrukturen und wirtschaftlichen Zielsetzungen sowie lokale Ereignisse sein. Wie Tabelle 13 zeigt, unterscheiden sich die Waldeigentumsverhältnisse in den einzelnen Bundesländern deutlich, jedoch ohne dass daraus Rückschlüsse auf die Holzeinschlagsquote gezogen werden könnten. Abbildung 23 wurde dem Ergebnisbericht zur dritten Bundeswaldinventur entnommen und stellt die regionale Verteilung des deutschen Waldes dar.

Abbildung 22: Anteile der Bundesländer an Holzeinschlag und Waldfläche Deutschlands



Hinweis: Bei der Angabe der Waldflächen wurden die Bundesländer Berlin und Brandenburg zusammengefasst und beim Land Brandenburg ausgewiesen.

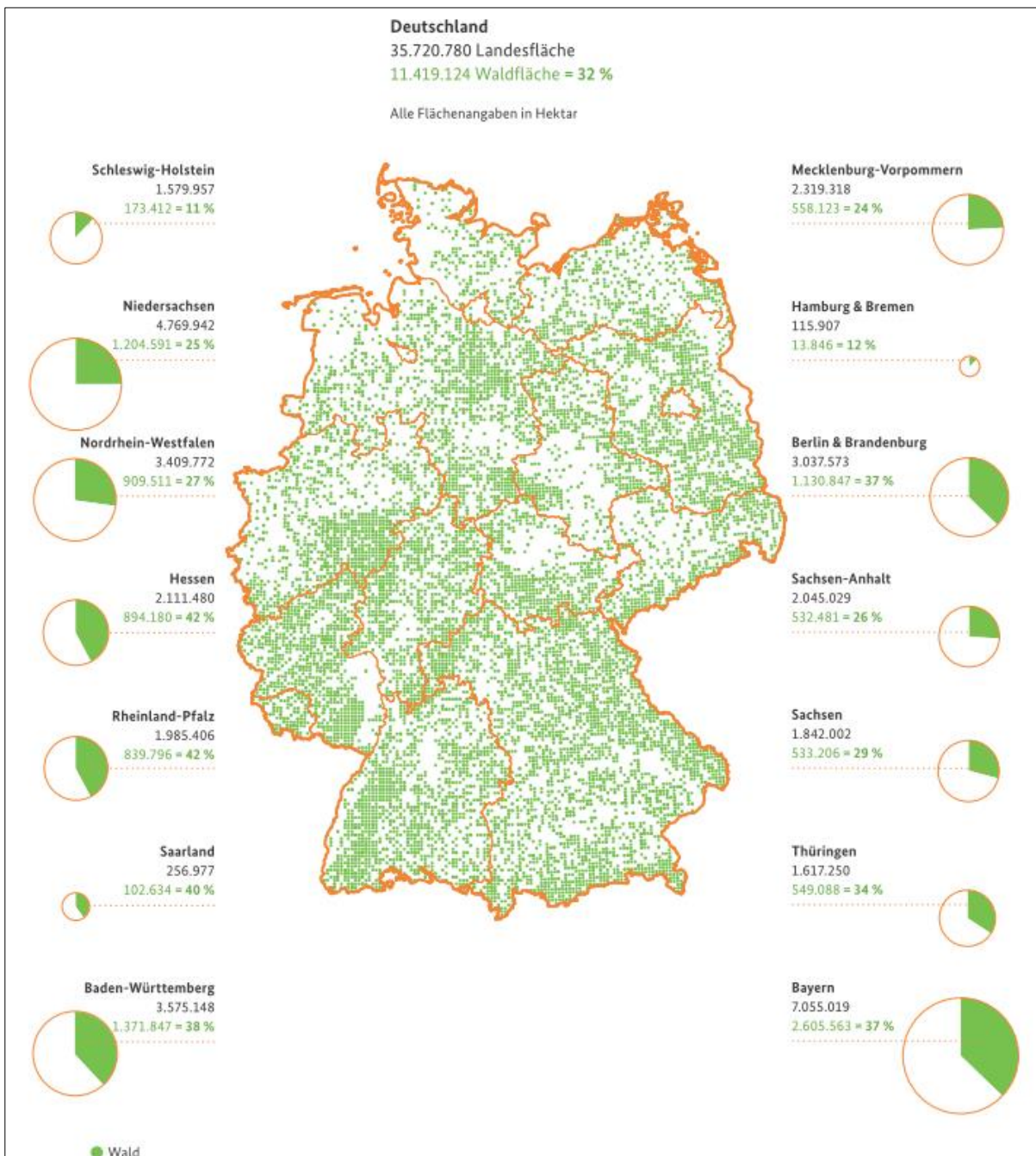
Daten: Statistisches Bundesamt (2018) und BMEL (2016a)

Tabelle 13: Anteile des Privatwaldes an den Waldflächen der Bundesländer im Jahr 2012

Bundesland	Privatwald	Bundesland	Privatwald
Baden-Württemberg	29 %	Nordrhein-Westfalen	62 %
Bayern	65 %	Rheinland-Pfalz	14 %
Brandenburg	60 %	Saarland	7 %
Hamburg & Bremen	0 %	Sachsen	7 %
Hessen	24 %	Sachsen-Anhalt	35 %
Mecklenburg-Vorp.	36 %	Schleswig-Holstein	45 %
Niedersachsen	44 %	Thüringen	37 %

Daten: BMEL (2016a)

Abbildung 23: Waldverteilung in Deutschland, 2012



Quelle: BMEL (2016a)

3.1.2 Holzeinschlag nach Holzsorten

Neben den Mengen der eingeschlagenen Holzarten weist das statistische Bundesamt den Derbholzeinschlag für die einzelnen Holzartengruppen auch nach Holzsorten und Bundesländern aus. Dabei wird differenziert nach Stammholz, Industrieholz, Energieholz und nicht verwertbarem Holz. Für den Bausektor ist hierbei insbesondere das Stammholz relevant, aus dem massives Schnittholz gewonnen wird. So entfallen im Neubau ca. zwei Drittel der Holzprodukte auf Schnittholz. Im Modernisierungsbereich ist der Anteil etwas geringer, jedoch ist der Modernisierungsmarkt für den Baubereich insgesamt bedeutender als der Neubausektor. Industrieholz dient nur in geringem Umfang als Rohstoff für den Bausektor, weil die Holzwerkstoffindustrie in großem Umfang Rest- und Recyclingholz verwendet.¹²

Abbildung 24 gibt das Volumen des Holzeinschlags nach Holzsorten wieder, wobei aufgrund des sehr geringen Umfangs auf die Darstellung der Angaben für die Bundesländer Berlin und Hamburg verzichtet wurde.¹³

Abbildung 25 stellt die prozentualen Anteile der jeweiligen Holzsorte pro Holzartengruppe dar, Abbildung 26 die prozentualen Anteile der jeweiligen Holzartengruppe an der Holzsorte. Es zeigt sich, dass die Nadelholzgruppe Fichte mit fast 70 % der größte Stammholzlieferant ist und daher für das Bauwesen eine besonders wichtige Rolle spielt. Insgesamt trägt Nadelholz mit knapp 90 % zum Stammholzaufkommen bei. Die Laubholzgruppe Buche liefert hingegen den größten Energieholzanteil.¹⁴

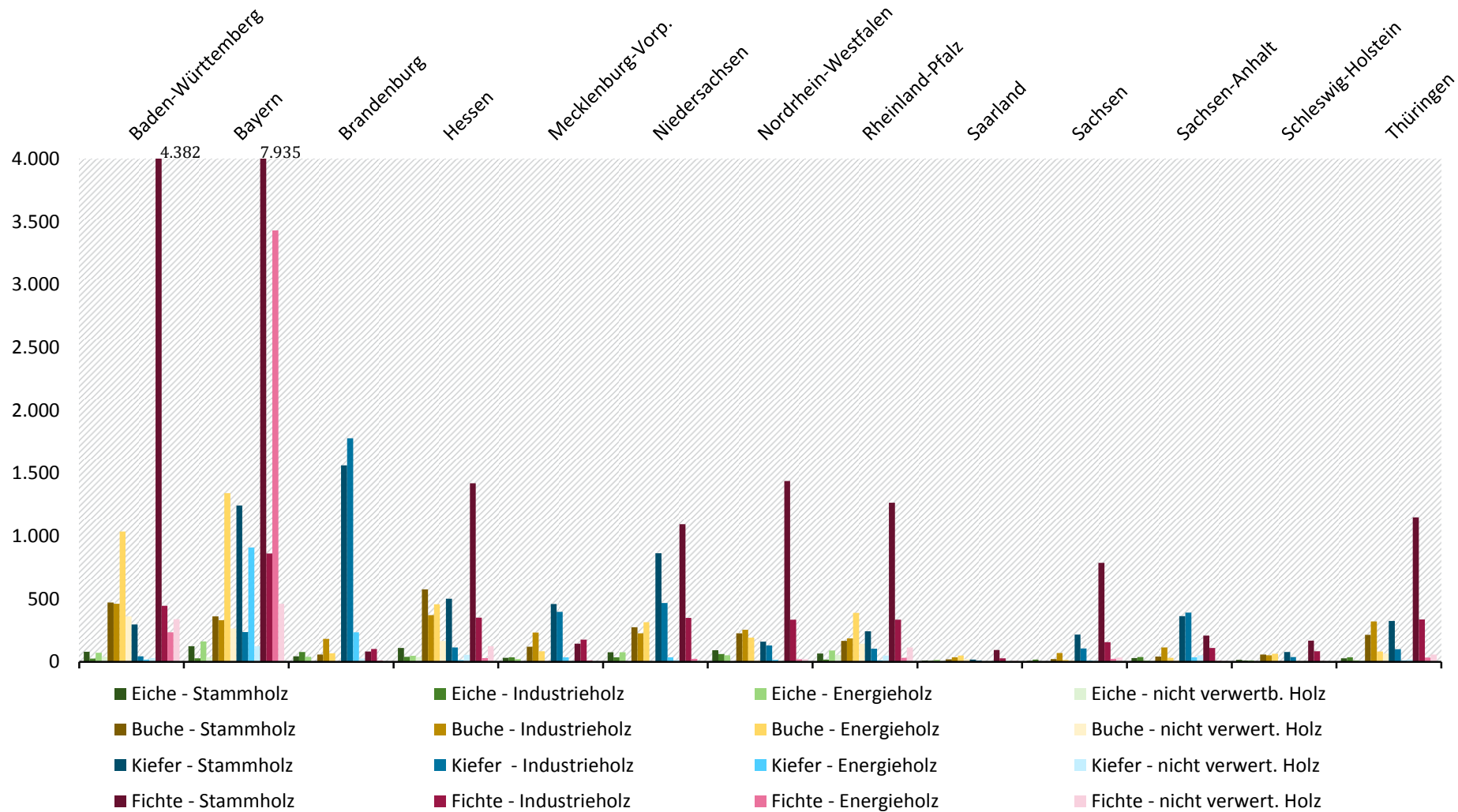
¹² Vgl. Mantau et al. (2013)

¹³ Zum Stadtstaat Bremen weist die Holzeinschlagsstatistik grundsätzlich keine Ergebnisse aus.

¹⁴ Vgl. Mantau et al. (2013)

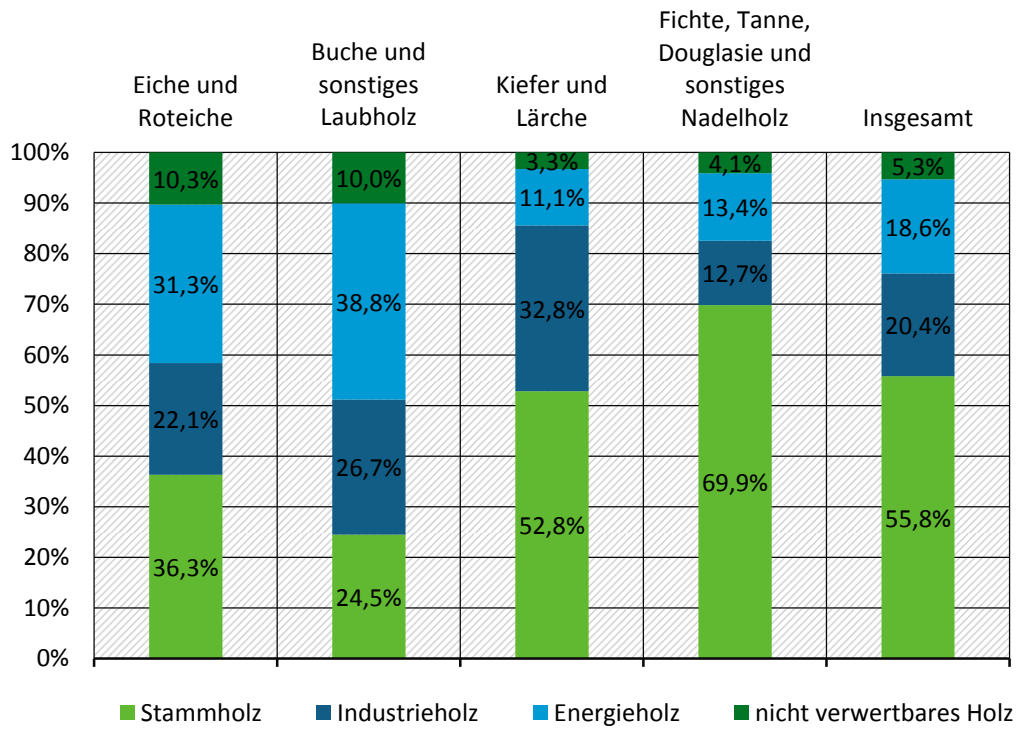
Abbildung 24: Holzeinschlag nach Holzsorten für die vier Holzartengruppen nach Bundesländern 2017

in 1.000 m³ (ohne Rinde)



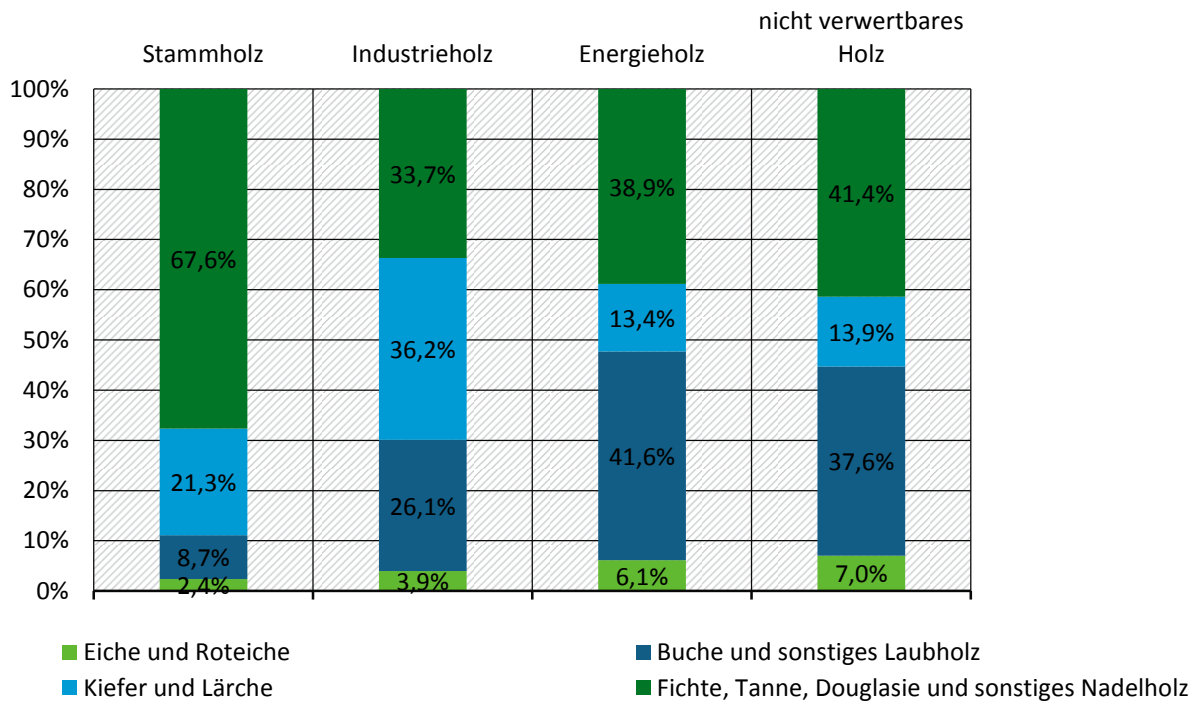
Daten: Statistisches Bundesamt (2018)

Abbildung 25: Anteile der Holzsorten an den verschiedenen Holzartengruppen, Holzeinschlag 2017



Daten: Statistisches Bundesamt (2018)

Abbildung 26: Anteile der Holzartengruppen an den verschiedenen Holzsorten, Holzeinschlag 2017



Daten: Statistisches Bundesamt (2018)

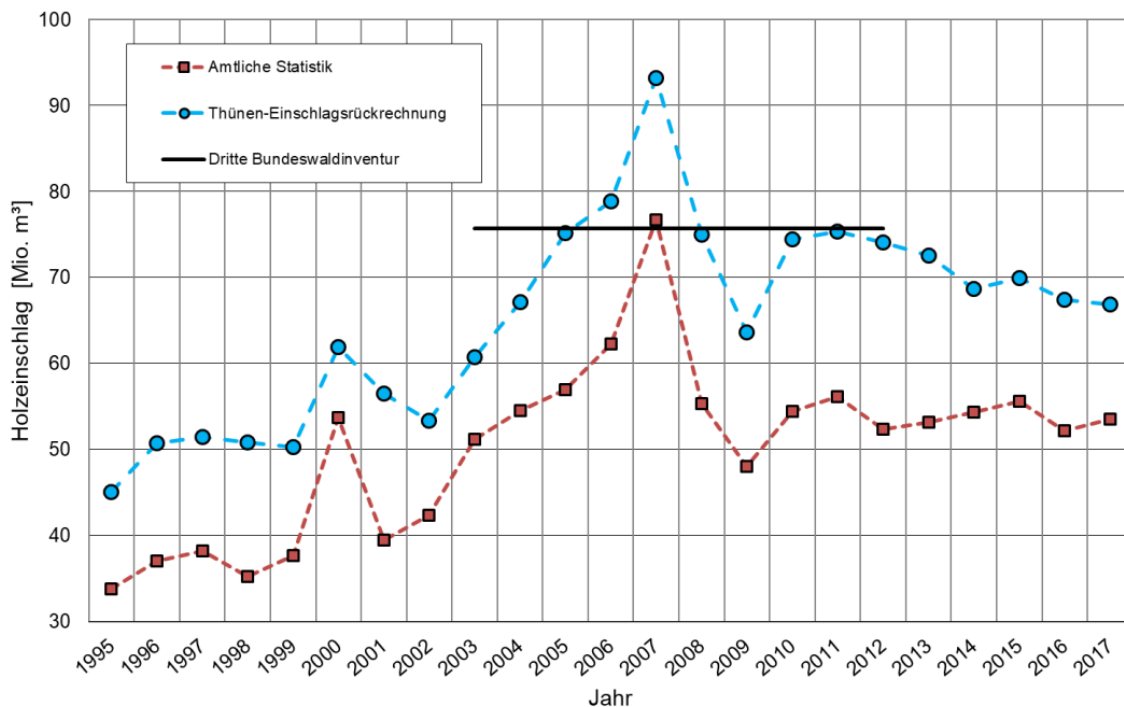
3.1.3 Amtlich nicht erfasster Holzeinschlag

Verschiedene Studien, die Bundeswaldinventur und die Einschlagsrückrechnung des Thünen-Instituts zeigen seit einigen Jahren, dass der tatsächliche Holzeinschlag in deutschen Wäldern von der amtlichen Holzeinschlagsstatistik des Statistischen Bundesamtes nicht vollständig abgebildet wird. Für den Zeitraum von 1995 bis 2015 wird vom Thünen-Institut eine mittlere Untererfassung des Holzeinschlags durch die amtliche Statistik von ca. 16 Mio. m³ angegeben, wobei die jährlichen Werte stark schwanken und zwischen 7,1 Mio. m³ im Jahr 2000 und 20,6 Mio. m³ im Jahr 2010 liegen.¹⁵ Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass der Holzeinschlag im Privatwald, der mit 48 % fast die Hälfte der deutschen Waldfläche beinhaltet, nicht direkt gemeldet sondern geschätzt wird.¹⁶ Insbesondere im Kleinprivatwald, der fast ein Viertel des deutschen Waldes und ca. 2 Millionen Eigentümer umfasst, wird aufgrund der schwierigen Erfassbarkeit ein hoher Anteil des nicht ausgewiesenen Holzeinschlags, insbesondere an Energieholz, vermutet.¹⁷ Außerdem wird davon ausgegangen, dass ein großer Teil des Energieholzeinschlags nicht ordnungsgemäß gemeldet wird.¹⁸

Die Ergebnisse der Einschlagsrückrechnung des Thünen-Instituts sind in nachfolgender Abbildung 27 dargestellt. Der aktuelle vorläufige Wert der Einschlagsrückrechnung des Thünen-Instituts für das Jahr 2017 beträgt 66,8 Mio. m³¹⁹ und liegt damit ca. 25 % über dem statistisch erfassten Wert von 53,5 Mio. EfmD o.R..

Abbildung 27: Holzeinschlag in Deutschland 1995-2017

in Mio. m³



Quelle: Thünen-Institut (2018)

¹⁵ Vgl. Weimar (2016)

¹⁶ Vgl. Jochem et al. (2015)

¹⁷ Vgl. Zukunft Holz GmbH (2012) und BMEL (2016b)

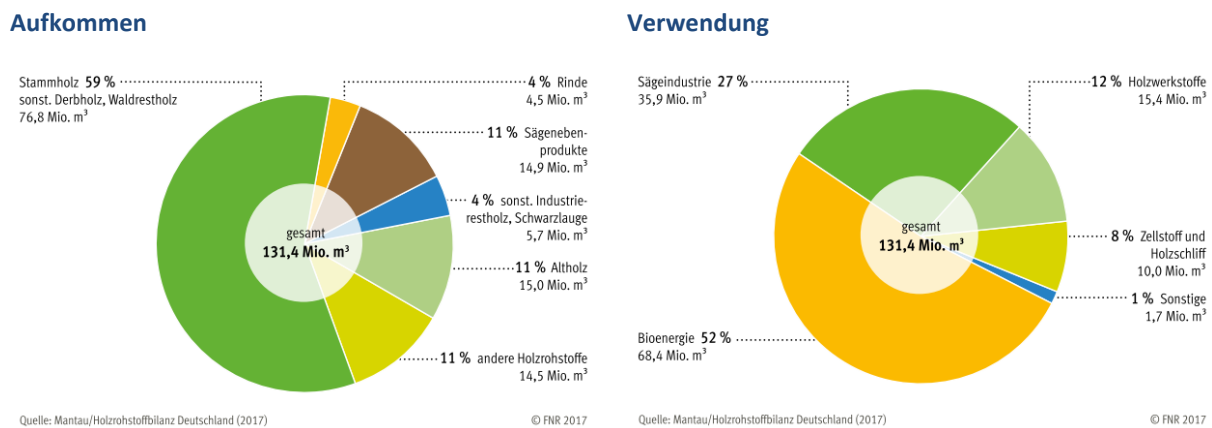
¹⁸ Vgl. Jochem et al. (2015)

¹⁹ Vgl. Thünen-Institut (2018)

Im Mittel werden etwa 54 % der nicht erfassten Waldholzentnahme für Energieholz verwendet.²⁰ Setzt man diesen prozentualen Mittelwert auch für den Holzeinschlag des Jahres 2017 an, so erhöht sich der Energieholzanteil von 18,6 % (siehe Abbildung 25) auf etwa 26 %. Die hier zitierte Studie von Jochem et al. (2015) weist für das Jahr 2013 für die Waldholzentnahme sogar einen Energieholzanteil von 33,4 % insgesamt und 63,4 % für Laubholz aus.²¹ Die vorn angegebenen Ergebnisse der Holzeinschlagsstatistik können demnach insbesondere für den Privatwald nur als grober Richtwert eingestuft werden.

Zum Vergleich soll an dieser Stelle ein Exkurs zur Holzrohstoffbilanz Deutschlands vorgenommen werden, welche sämtliche Holzrohstoffströme eines Jahres quantifiziert und diesen die jeweilige Nutzung bzw. Verwendung gegenüberstellt. Die Holzrohstoffströme umfassen neben dem der Nutzung zugeführten Waldholz auch die übrigen Holzrohstoffe wie Sägenebenprodukte, Altholz, Industrierestholz, Schwarzlaube, Landschaftspflegematerial und Holz aus Kurzumtriebsplantagen. Betrachtet man die Verwendung dieser Rohstoffe im Jahr 2015, so zeigt sich, dass mit 52 % mehr als die Hälfte der Rohstoffe energetisch und lediglich 48 % stofflich genutzt werden.

Abbildung 28: Holzrohstoffbilanz Deutschlands 2015



Quelle: FNR (2018a), Primärdaten: Mantau, Holzrohstoffbilanz Deutschland (2017) (nicht eingesehen)

3.2 Zukünftiges Holzpotenzial Deutschlands

3.2.1 Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung WEHAM: Basis- und Alternativszenarien

Zur Abschätzung zukünftiger Holzvorräte und -aufkommen wurde in Deutschland in Zusammenarbeit von Bund und Ländern die Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung (WEHAM) erarbeitet. Hierbei handelt es sich um ein Simulationsmodell, welches auf der Grundlage der dritten Bundeswaldinventur aus dem Jahr 2012 die bisherige Waldentwicklung über 40 Jahre bis 2052 im sogenannten „WEHAM-Basiszenario“ fortschreibt. Im WEHAM-Basiszenario werden die aktuellen und erwarteten ökonomischen und legislativen Rahmenbedingungen der Waldwirtschaft abgebildet. Baumartenwechsel im Zuge der Waldverjüngung können im Modell nicht berücksichtigt werden.²²

Ergänzend hierzu wurden im Verbundforschungsprojekt „WEHAM-Szenarien“ in einem Beteiligungsprozess mit Stakeholdern zwei alternative Waldbehandlungsszenarien (und zwei Holzverwendungsszenarien) entwickelt und mit dem WEHAM-Simulationsmodell berechnet. Beim

²⁰ Vgl. Jochem et al. (2015)

²¹ Vgl. Jochem et al. (2015)

²² Vgl. BMEL (2016b)

Alternativszenario "Holzpräferenz" handelt es sich um ein Modell, das auf eine Vorratsabsenkung und eine Steigerung des Rohholzpotenzials abzielt. Hingegen stehen beim Alternativszenario "Naturschutzpräferenz" der Erhalt und die Förderung der Biodiversität im Vordergrund.²³ Tabelle 14 stellt die Waldbewirtschaftungsprinzipien der beiden alternativen Waldbehandlungsszenarien einander gegenüber.

Weitere Szenarien wurden vom Öko-Institut Freiburg im Rahmen der Studie „Waldvision Deutschland“ im Auftrag von Greenpeace entwickelt.²⁴ Auch hier liegen die Bestandsdaten der dritten Bundeswaldinventur zugrunde, allerdings erfolgt die Simulation mit dem Waldwachstumsmodell FABio des Öko-Instituts. Da die Diskussion um die methodische Vorgehensweise in der Studie noch nicht abgeschlossen ist und für Aussagen zum zukünftigen deutschen Holzpotenzial an dieser Stelle die WEHAM-Szenarien ausreichend sind, wird auf die Alternativszenarien der Waldvision-Studie hier nicht weiter eingegangen.

Die Ergebnisse der Szenarien sind nicht als Vorhersagen zu verstehen, da den Modellen vereinfachende Annahmen zugrunde liegen, die ein komplexes System wie den Wald und die ihn beeinflussenden Faktoren wie seine Behandlung und das Klima nur beschränkt abbilden können.²⁵ Es entstehen so Ungenauigkeiten, die die Aussagekraft der Ergebnisse einschränken. Die Ergebnisse zeigen jedoch Entwicklungs- und Gestaltungsspielräume und deren Folgewirkungen auf und erlauben auf dieser Basis die Beurteilung von Handlungsoptionen.²⁶

Tabelle 14: Informationen zu den WEHAM-Waldbehandlungsszenarien

Holzpräferenzszenario	Naturschutzpräferenzszenario
Laubholzflächenanteil von derzeit 42 % beibehalten (Stand BWI 2012).	Laubholzflächenanteil um 15 % erhöhen durch gezielte Verjüngung.
Nadelholzflächenanteil von derzeit 58 % beibehalten (Stand BWI 2012).	Nadelholzflächenanteil um 19 % absenken durch Verkürzung der Umtriebszeiten von Fichte und Kiefer an Nicht-pnV-Standorten.
Anteile des schnell wachsenden Nadelholzes (z. B. Douglasie) um 17 % erhöhen. Verjüngung der Fichten- und Kiefernbestände zum Produktionszeitende mit Douglasie.	Anteile nichtheimischer Baumarten (z. B. Douglasie) beibehalten.
Umtriebszeit (Erntezeitpunkt) deutlich reduzieren. Zielstärken reduzieren.	Annäherung der Baumartenanteile an die potenziell natürliche Vegetation (pnV), Anstieg der Umtriebszeiten für Bäume der pnV durch Übergang in die Dauerwaldbewirtschaftung.
Holzvorrat von 336 m ³ /ha auf 289 m ³ /ha reduzieren (Niveau BWI 1987). Damit erfolgt Holznutzung begrenzt über dem Zuwachs.	Holzvorrat von 336 m ³ /ha auf 374 m ³ /ha erhöhen.
Status quo naturschutzfachlicher Maßnahmen im Wald erhalten, aber nicht weiter erhöhen.	Höhere Nutzungseinschränkungen auf Flächen mit reduziertem Holzaufkommen. Gesamtschutzfläche beibehalten.
Totholzvorrat von derzeit 14,7 m ³ /ha beibehalten	Totholzvorrat von derzeit 14,7 m ³ /ha auf 35 m ³ /ha

²³ Vgl. Seintsch et al. (2017)

²⁴ Vgl. Böttcher et al. (2018)

²⁵ Vgl. BMEL (2016b)

²⁶ Vgl. Schier und Weimar (2018)

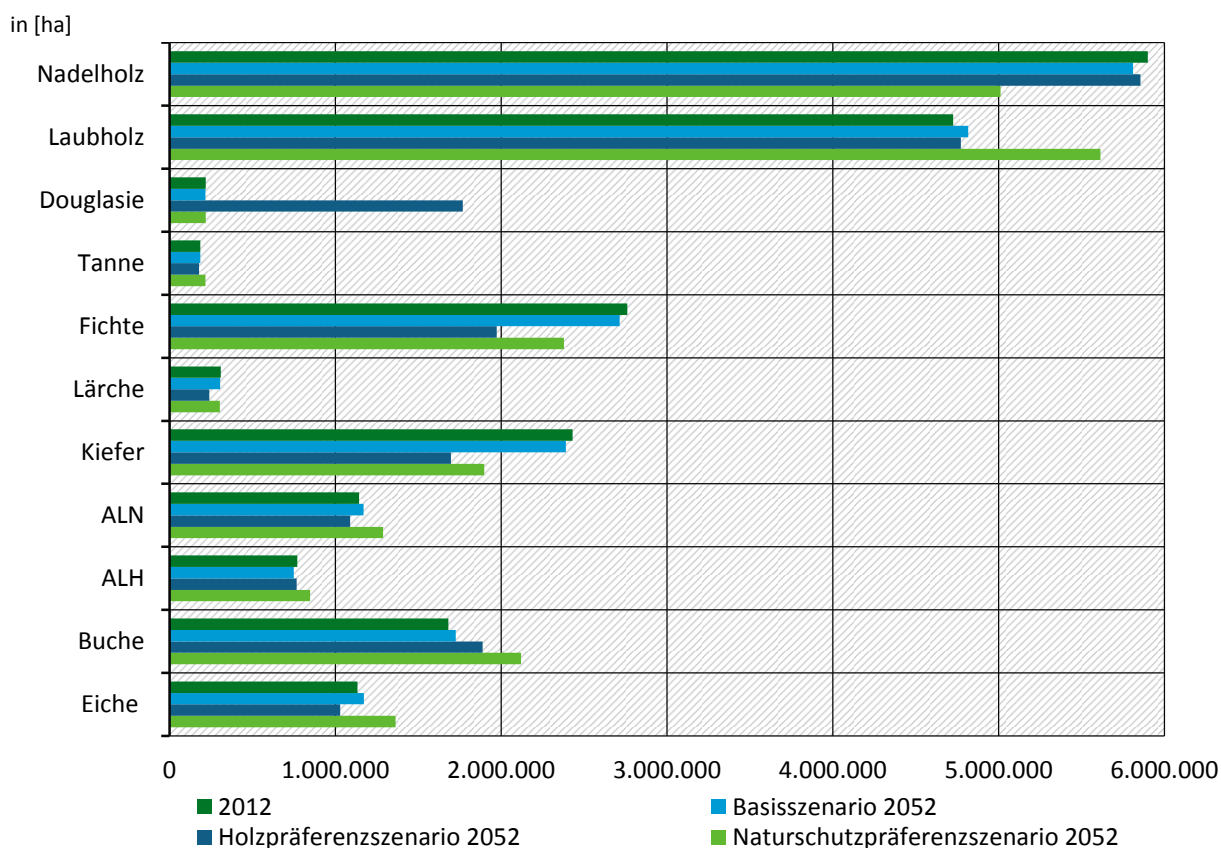
Holzpräferenzszenario	Naturschutzpräferenzszenario
(Niveau BWI 2012). ¹	erhöhen. ¹

¹ Der angestrebte Totholzvorrat kann nur außerhalb des WEHAM-Modells rechnerisch berücksichtigt und muss nachträglich von den modellierten Rohholzpotenzialen abgezogen werden.

Quellen: Seintsch et al. (2017), FNR (2018)

Wie sich die Baumartenflächen in Folge der jeweiligen Waldbewirtschaftungsziele der Szenarien verändern, ist in Abbildung 29 dargestellt. Im Basisszenario bleiben die Flächen annähernd konstant, weil keine Baumartenwechsel modelliert wurden. Im Holzpräferenzszenario ist insbesondere der Rückgang der Fichtenflächen um 29 % und der Kiefernflächen um 30 % auffällig. Demgegenüber steht ein sehr deutlicher Anstieg der Douglasienfläche auf insgesamt 17 % der Waldfläche, sodass der Anteil der Waldfläche mit Nadelholz gegenüber 2012 annähernd konstant bleibt und weiterhin 58% beträgt. Beim Naturschutzpräferenzszenario sind die Verringerungen der Fichten- und Kiefernfläche mit 14 % bzw. 20 % kleiner, die Douglasienfläche bleibt konstant. Die Waldfläche mit Nadelholzbestand sinkt auf insgesamt 47 %. Hingegen ist ein Zuwachs der Buchenfläche um 26 % und der Eichenfläche um 20 % festzustellen.²⁷

Abbildung 29: Entwicklung der Baumartenflächen von 2012 zu 2052 in den drei WEHAM-Szenarien²⁸



Daten: BMEL (2017), Oehmichen et al. (2017)

²⁷ Vgl. Oehmichen et al. (2017)

²⁸ ALH: sonstige Laubbölder mit hoher Lebensdauer (Ahornarten, Ahornblättrige Platane, Edelkastanie, Esche, Hainbuche, Lindenarten, Nussbaumarten, Robinie, Rosskastanie, Speierling, Stechpalme, Ulme, Weißesche), ALN: sonstige Laubbölder mit niedriger Lebensdauer (Birkenarten, Elsbeere, Erlenarten, Pappelarten, Traubenkirsche-Arten, Vogelkirsche, Wildobst, alle weiteren Laubbäumarten, soweit sie nicht gesondert genannt sind)

3.2.2 Entwicklung des Hektarvorrats des Holzes und des Rohholzpotenzials in Deutschland

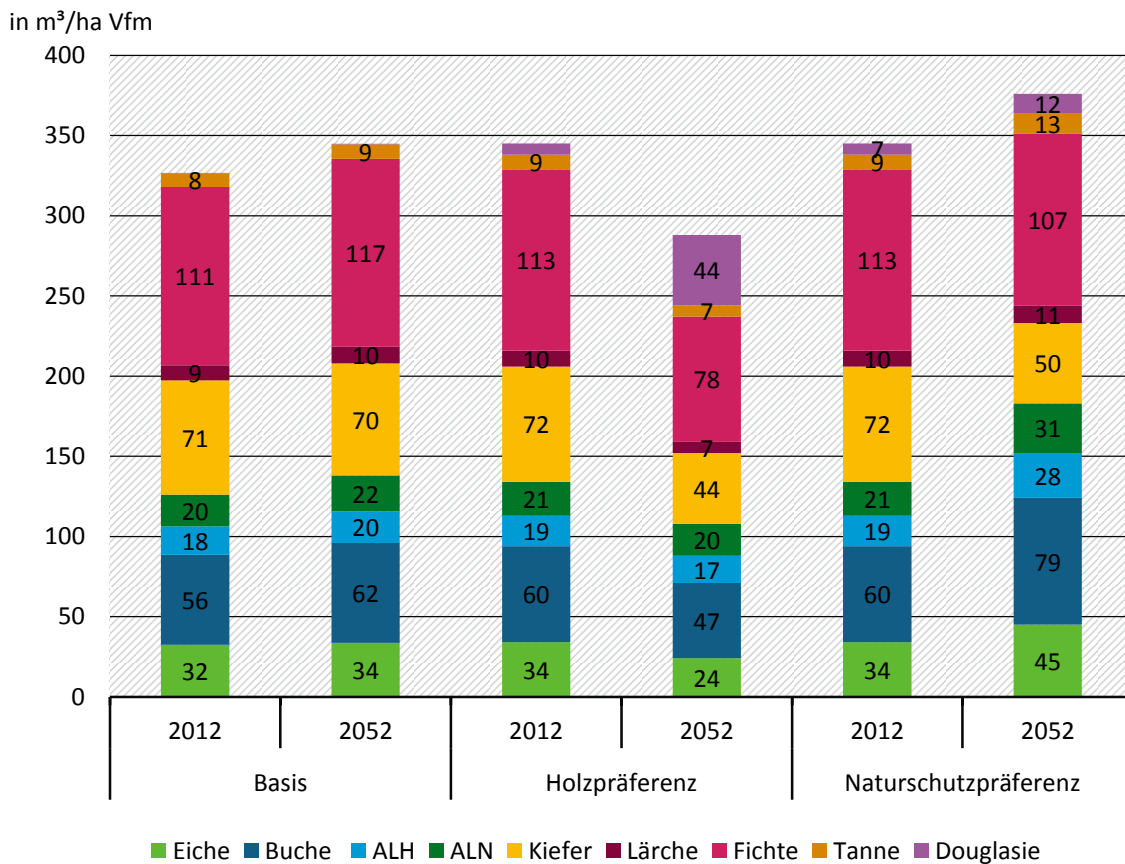
In den folgenden Abbildungen werden die Ergebnisse der WEHAM-Simulationen zur Entwicklung des Derbholtzvorrats je Waldhektar und des Rohholzpotenzials für verschiedene Waldbehandlungsszenarien dargestellt.

Abbildung 30 zeigt, dass der Hektarvorrat über die Simulationsperiode beim Basisszenario insgesamt leicht um ca. 5 % zunimmt. Beim Holzpräferenzszenario sinkt er wie im Modell festgelegt um 17 %, beim Naturschutzpräferenzszenario steigt er entsprechend um 9 %. Außerdem steigen beim Basisszenario sowohl der Laubholz- als auch der Nadelholzvorrat um 10 % bzw. 3 %. Im Holzpräferenzszenario sinken beide Vorräte deutlich, der Laubholzvorrat um 19 %, der Nadelholzvorrat um ca. 15 %. Hingegen sinkt beim Naturschutzpräferenzmodell nur der Nadelholzvorrat um ca. 9 %, der Laubholzvorrat steigt um ca. 37 %.

Je nach Holzart gibt es erhebliche Unterschiede in der Entwicklung des Hektarvorrats, die sich aus den Randbedingungen der Modelle ergeben. Auffällig ist dies z. B. bei der Fichte, deren Hektarvorrat sich beim Basisszenario leicht um ca. 5 % erhöht, sich aufgrund der stärkeren Nutzung beim Holzpräferenzszenario stark um ca. 31 % und beim Naturschutzpräferenzszenario leicht um 5 % verringert. Der Hektarvorrat der Buche steigt im Basisszenario um ca. 11 %, reduziert sich im Holzpräferenzszenario um ca. 22 % und verzeichnet im Naturschutzpräferenzszenario einen Anstieg um ca. 32 %. Die Entwicklungen für weitere Baumarten können der Abbildung 30 entnommen werden.²⁹

²⁹ Beim Vergleich der Daten zwischen Basisszenario und Alternativszenarien ist zu berücksichtigen, dass sie sich auf unterschiedliche Datengrundlagen beziehen. Das Basisszenario umfasst gemäß BMEL (2017) nur die Bäume im Hauptbestand und Plenterwald, die Alternativszenarien berücksichtigen gemäß Oehmichen (2017) jedoch den Gesamtbestand. Dies erklärt auch die großen Abweichungen bei der Douglasie.

Abbildung 30: Holzvorratsentwicklung in den WEHAM-Szenarien



Vorratsentwicklung in den WEHAM-Szenarien [m³/ha Vfm] für die Jahre 2012 und 2052. Das Basisszenario umfasst dabei nur die Bäume im Hauptbestand und Plenterwald, die Alternativszenarien umfassen hingegen den Gesamtbestand, was die Vergleichbarkeit einschränkt.

Daten: BMEL (2017), Oehmichen et al. (2017)

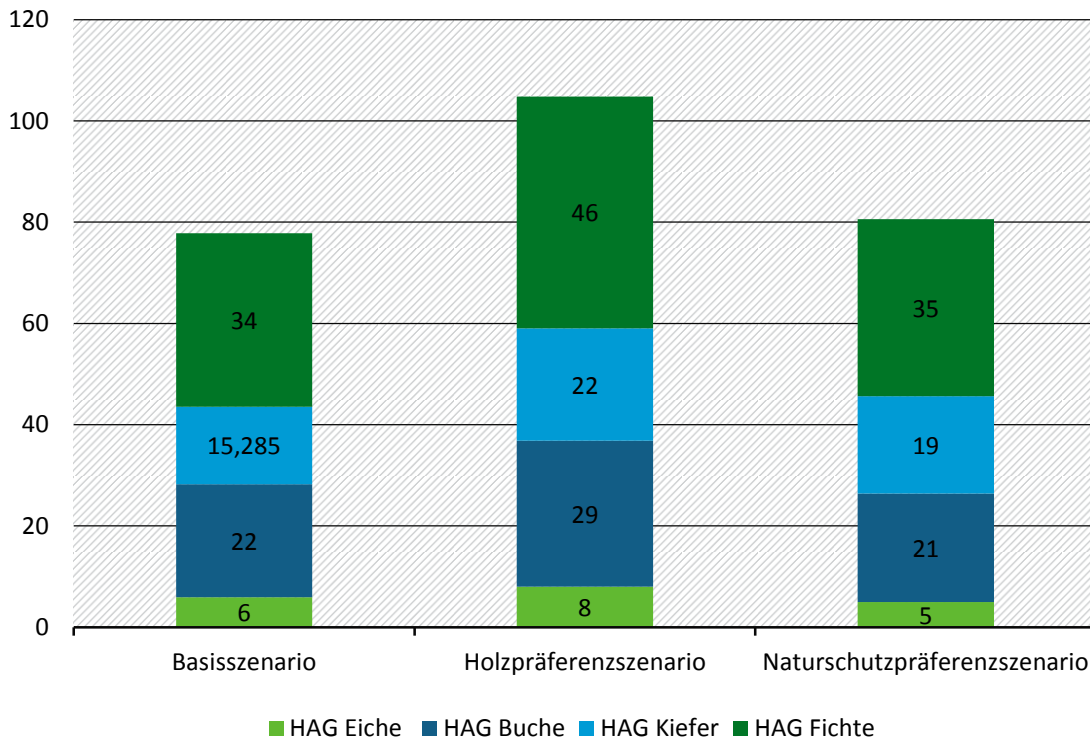
Abbildung 31 gibt das berechnete verwertbare Rohholzpotenzial der vier Holzartengruppen für die drei Waldentwicklungsmodelle an. Zum Ausgleich von Modellierungseffekten erfolgt die Angabe mittlerer Werte über die gesamte Modellierungsperiode von 40 Jahren.³⁰ Das abgebildete Rohholzpotenzial erfasst hier alle Anteile, auch die als nicht verwertbar deklarierten. Außerdem enthalten die in der Abbildung ausgewiesenen Potenziale noch den jeweiligen Totholzzielvorrat. Die tatsächlich nutzbaren Potenziale fallen dementsprechend niedriger aus.³¹ Ohne Korrektur um den angestrebten Totholzzielvorrat weisen beide Alternativszenarien im Mittel höhere Rohholzpotenziale als das Basisszenario auf. Nach Abzug des Totholzzielvorrats liegt der Wert des Basisszenarios zwischen den Werten der beiden Alternativszenarien. Die um den angestrebten Totholzzielvorrat korrigierten Werte sind in Tabelle 17 ausgewiesen.

³⁰ Vgl. BMEL (2016b)

³¹ Vgl. Oehmichen et al. (2017)

Abbildung 31: Mittleres projiziertes Rohholzpotenzial in den WEHAM-Szenarien über den Zeitraum der Modellierungsperiode 2013-2052

in Mio. m³/a Efm, inkl. nicht verwertbarer Anteile, ohne Abzug Totholzvorrat



Daten: BMEL (2017) und Oehmichen et al. (2017)

Die oben angegebenen Werte des Rohholzpotenzials in den Alternativszenarien wurden wie die Angaben zur Flächen- und Vorratsentwicklung der Arbeit von Oehmichen et al. (2017) entnommen. Auch in FNR (2018b) werden mittlere Rohholzpotenziale genannt. Des Weiteren werden in Döring et al. (2017) und Schier und Weimar (2017)³² Angaben zur Größe der verwertbaren Rohholzpotenziale gemacht. Da sich die Zahlen zum Teil etwas unterscheiden und Grundlage für Kapitel 3.3 bilden, werden sie in Tabelle 15 zusammengestellt. In der Tabelle werden ergänzend auch die von den modellierten Rohholzpotenzialen abzuziehenden Totholzzielgrößen angegeben.

Ein Vergleich der Werte zum Rohholzpotenzial von Oehmichen et al. (2017) und FNR (2018b) mit dem Gesamtrohholzpotenzial zeigt nahezu übereinstimmende Zahlen beim Holzpräferenzszenario, jedoch Abweichungen beim Naturschutzpräferenzszenario und hier insbesondere beim Laubholz. Unterschiede gibt es auch zwischen den Werten zum verwertbaren Rohholzpotenzial von Döring et al. (2017) sowie Schier und Weimar (2017) beim Naturschutzpräferenzszenario. Der Unterschied fällt hier bei den Angaben zum Laubholzpotenzial sehr deutlich aus. Die Ursachen für die jeweiligen Unterschiede konnten anhand der ausgewerteten Quellen nicht ermittelt werden. Für ein vollständiges Verständnis der Modellergebnisse wäre dies jedoch empfehlenswert.

³² sowie Schier und Weimar (2018)

Tabelle 15: Rohholzpotenziale – Werte verschiedener Quellen

in Mio. m³/a Efm

Potenzial	Basisszenario		Holzpräferenzszenario		Naturschutzszenario	
	Nadelholz	Laubholz	Nadelholz	Laubholz	Nadelholz	Laubholz
BMEL (2017) – Rohholzpotenzial, auch nicht verwertbar	49,5	28,3				
BMEL (2017) – Rohholzpotenzial, verwertbar	45,7	24,7				
Oehmichen et al. (2017) Rohholzpotenzial ^{1,2}			68,0	36,9	54,2	26,4
FNR (2018b) Rohholzpotenzial ^{1,3}			67,9	36,8	53,3	24,9
Döring et al. (2017) – Rohholzpotenzial, verwertbar	45,7	24,7	64,8	35,5	51,1	23,9
Schier und Weimar (2017) – Rohholzpotenzial, verwertb. ²	45,7	24,7	64,9	35,5	50,1	16,6
<i>Schier und Weimar (2017) – Totholz</i>	2,7	1,7	2,8	1,8	6,8	4,5

¹ Es wird davon ausgegangen, dass beide Quellen das gesamte Rohholzpotenzial inkl. der als nicht verwertbar deklarierten Anteile oder eines Anteils davon angeben, da in den Quellen keine weitere Erläuterung erfolgt und die Werte größer sind als bei den Quellen, die explizit nur die als verwertbar deklarierten Anteile angeben.

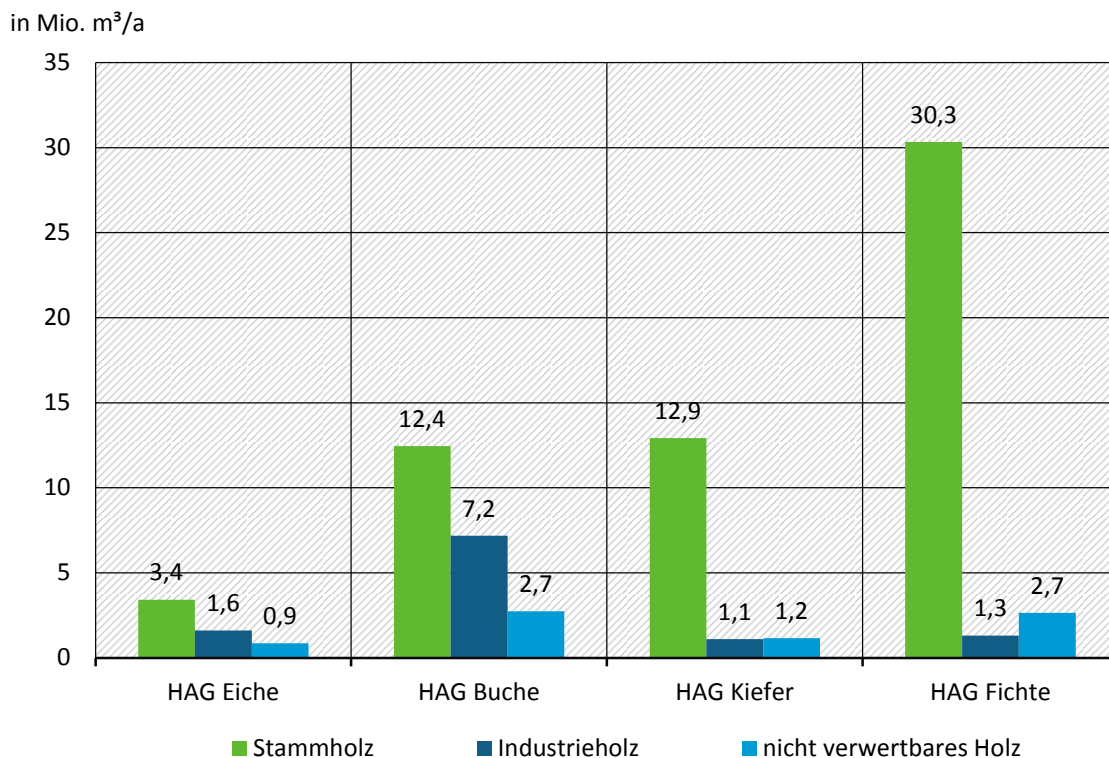
² Werte wurden als Mittelwert der in der Quelle angegebenen periodenweisen Ergebnisse berechnet.

³ Primärquellen: Mantau, U. (2018): Holzrohstoffbilanzen und Stoffströme des Holzes – Entwicklungen in Deutschland 1987 bis 2016. Schlussbericht. Hamburg. (noch nicht veröffentlicht) sowie Oehmichen, K.; Dunker, K.; Gerber, K.; Klatt, S.; Röhling, S. (2017): WEHAM AP2. www.weham-szenarien.de

Daten: siehe linke Spalte

Wie sich das Rohholzpotenzial nach Holzsorten im Basisszenario für die einzelnen Holzartengruppen über die Modellierungsperiode berechnet, stellt Abbildung 32 dar. Demnach bleibt die Holzartengruppe Fichte wichtigster Stammholzlieferant und trägt mehr als die Hälfte zum Gesamtvolumen von 59,1 Mio. m³/a bei. Die Holzartengruppen Buche und Kiefer liefern jeweils etwa ein Viertel des Stammholzes. Dies weist auf die zunehmende Bedeutung der Laubhölzer für die Bauindustrie hin. Die Holzartengruppe Buche stellt im Basisszenario außerdem den wichtigsten Industrieholzlieferanten dar. Vergleichbare Angaben aus den Alternativszenarien standen nicht zur Verfügung.

Abbildung 32: WEHAM-Basisszenario: Mittlerer projizierter Vorrat [Mio. m³/a] des Rohholzpotenzials nach Holzsorten für die Holzartengruppen für die Betrachtungsperiode 2013-2052



Daten: BMEL (2017)

3.2.3 Regionale Entwicklung des Rohholzpotenzials

Die Aufteilung des Rohholzpotenzials zwischen den einzelnen Bundesländern korreliert mit den Waldflächenanteilen der Bundesländer und ist in Tabelle 16 aufgeführt. Angaben für die Alternativszenarien sind nicht bekannt, allerdings sind auch keine größeren relativen Abweichungen zu erwarten. Abbildung 33 visualisiert die Ergebnisse der Tabelle.

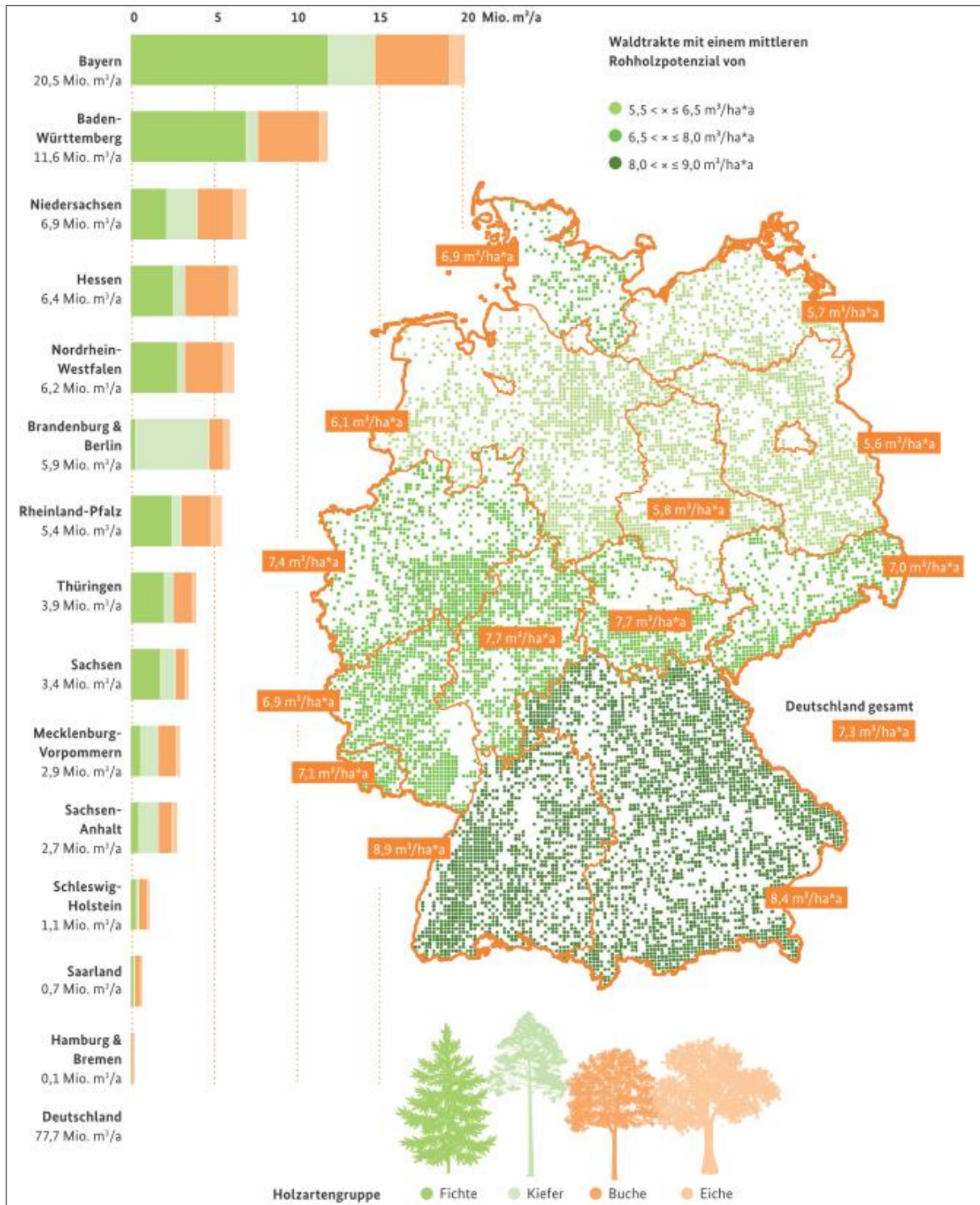
Tabelle 16: WEHAM-Basisszenario: Rohholzpotenzial der Bundesländer sowie ihr Anteil am Gesamtpotenzial in den Jahren 2013-2052 und Angabe des Waldanteils gemäß BWI 2012

Bundesland (BL)	Rohholzpotenzial in Mio. m ³ /a Efm 2013-2052	Rohholzpotenzial in Mio. m ³ /a Efm, nur verwertbar 2013-2052	Anteil Rohholzpotenzial (verwertbar) BL am Gesamtpotenzial D 2013-2052	zum Vergleich: Anteil Waldfläche BL an Gesamtwaldfläche (2012)
Baden-Württemberg	11,6	10,8	15 %	12 %
Bayern	20,5	18,5	26 %	23 %
Berlin & Brandenburg	5,9	5,3	8 %	10 %
Hessen	6,4	5,4	8 %	8 %
Mecklenburg-Vorp.	2,9	2,8	4 %	5 %
Niedersachsen	6,9	6,3	9 %	10 %
Nordrhein-Westfalen	6,2	5,7	8 %	8 %

Bundesland (BL)	Rohholzpotezial in Mio. m ³ /a Efm 2013-2052	Rohholzpotezial in Mio. m ³ /a Efm, nur verwertbar 2013-2052	Anteil Rohholzpotezial (verwertbar) BL am Gesamtpotezial D 2013-2052	zum Vergleich: Anteil Waldfläche BL an Gesamtwaldfläche (2012)
Rheinland-Pfalz	5,4	4,9	7 %	7 %
Saarland	1,3	0,6	1 %	1 %
Sachsen	3,4	2,9	4 %	5 %
Sachsen-Anhalt	2,7	2,5	4 %	5 %
Schleswig-Holstein	1,1	1,0	1 %	1 %
Thüringen	3,9	3,5	5 %	5 %

Daten: BMEL (2016a, 2016b)

Abbildung 33: WEHAM-Basisszenario: Jährliches Rohholzpotenzial im Mittel der Jahre 2013-2052 in Deutschland (in Mio. m³/a Efm einschließlich nicht verwertbarer Anteile)



Quelle: BMEL (2016b)

3.3 Gegenüberstellung von Derbholzverwendung und Rohholzpotenzial

In den vorhergehenden Kapiteln wurde zum einen ein Überblick über den erfassten aktuellen Rohholzeinschlag und damit die aktuelle Waldnutzung in Deutschland gegeben. Zum anderen wurde das über Modellierungen berechnete zukünftige Rohholzpotenzial abgebildet. Die gerntete Derbholzmenge bestimmt wesentlich den Umfang der Holzverwendung in Deutschland und hier insbesondere auch die Potenziale im Holzbau. Eine Gegenüberstellung der aktuellen Derbholzverwendung mit dem zukünftig zur Verfügung stehenden Rohholzpotenzial erlaubt eine Einschätzung, in welchem Umfang eine Holzverwendung aus einheimischen Ressourcen in Zukunft möglich ist. Das gegebenenfalls daraus ableitbare Steigerungspotenzial der Holzbauquote wird in Kapitel 4.1 betrachtet.

Die für den Vergleich benötigte Kenngröße der Derbholzverwendung wird der aktuellen Holzrohstoffbilanz für das Jahr 2016 entnommen.³³ Die in Kapitel 3.1 aufgeführten Daten des Holzeinschlags könnten hierfür aufgrund der unvollständigen Datenbasis und der nicht zwangsläufig vollständigen Nutzung des jährlichen Holzeinschlags nur abschätzend verwendet werden. Neben der gesamten Inlandsverwendung an Derbholz werden in der Gegenüberstellung auch die Waldholznutzung und der Außenhandelsaldo mit angegeben, um zwischen einheimischer Waldnutzung und Holzimport differenzieren zu können.

Die aus der Holzrohstoffbilanz abgeleiteten Daten zur Derbholzverwendung beinhalten das Sägestammholz und das sonstige Derbholz und somit die als verwertbar eingestuften Rohholzanteile, jedoch nicht die als nicht verwertbar deklarierten (sogenanntes Waldrestholz, z. B. X-Holz und U-Holz). Dementsprechend werden der Derbholzverwendung ebenfalls nur die als verwertbar eingestuften Rohholzpotenzialanteile gegenübergestellt, auch wenn in der Praxis offenbar auch die als nicht verwertbar eingestuften Hölzer vollständig verwendet werden können.³⁴ Als Rohholzpotenzial wird jeweils der Mittelwert der über die Modellierungsperiode 2013 bis 2052 berechneten Einzelpotenziale wie in Tabelle 15 angegeben verwendet. Es werden die Zahlen aus Döring et al. (2017) herangezogen, die mit den Werten von Schier und Weimar (2017) bis auf den Wert für Laubholz im Naturschutzpräferenzszenario weitgehend übereinstimmen. Beim Vergleich mit den Angaben in Oehmichen et al. (2017) und FNR (2018b) erscheint dieser Wert bei Döring et al. (2017) plausibler. Die Gegenüberstellung von Derbholzverwendung und Potenzial erfolgt in Tabelle 17.

Das verwertbare Derbholzpotenzial wird in Tabelle 17 abzüglich des Totholzzielvorrats angegeben, da nur dieses Potenzial entsprechend den Szenarienrandbedingungen tatsächlich verwendet werden kann. Die Werte für das jeweils abzuziehende Totholz wurden Schier und Weimar (2017) entnommen. Da in FNR (2018b) die Gegenüberstellung von Derbholzverwendung und Rohholzpotenzial für die Potenziale inklusive des Totholzvorrats erfolgt, wird dieser Fall in Tabelle 17 zum Vergleich mit aufgeführt. Es werden jedoch auch hier ausschließlich die verwertbaren Derbholzpotenziale, wie in Döring et al. (2017) angegeben, verwendet.

Die Auswertung der Gegenüberstellung von Derbholzverwendung und verfügbaren Derbholzpotenzialen in Tabelle 17 zeigt, dass die Waldholznutzung des Jahres 2016 in allen drei Szenarien sowohl für Nadel- als auch für Laubholz aus den zukünftigen mittleren Potenzialen gedeckt werden könnte. Einzig im Fall des Basisszenarios zeigt sich für Nadelholz eine geringfügige Unterdeckung, die aber durch Laubholz substituiert werden könnte. Eine Erhöhung des Anteils importierten Holzes wäre somit bei einer auf dem Niveau von 2016 verbleibenden Nutzung auch

³³ FNR (2018b)

³⁴ Vgl. Schier und Weimar (2018). Die nicht verwertbaren Rohholzanteile werden hier vollständig der energetischen Nutzung zugeordnet.

zukünftig nicht erforderlich. Beim Laubholz wäre in allen drei Szenarien sogar ein vollständiger Importverzicht möglich, beim Nadelholz nur im Holzpräferenzszenario.

Tabelle 17: Vergleich der Holzverwendung 2016 mit den mittleren WEHAM-Derbholzpotezialen 2013-2052

Derbholzverwendung (ohne Lagerbestandsveränderung)		Summe		Nadelholz		Laubholz	
		Mio. m ³	%	Mio. m ³	%	Mio. m ³	%
Inlandsverwendung		66,6	107,1	49,4	111,5	17,2	96,1
Außenhandelsaldo		4,4	7,1	5,1	11,5	-0,7	-3,9
Waldholznutzung		62,2	100	44,3	100	17,9	100
Mittleres jährl. Rohholznutzungspotenzial nach WEHAM ¹		Mio. m ³	% ²	Mio. m ³	% ²	Mio. m ³	% ²
Basis-szenario	Verwertbares Rohholzpotezial, inklusive Totholz (zum Vergleich)	70,4	106 113	45,7	93 103	24,7	144 138
	Verwertbares Rohholzpotezial, abzüglich Totholz	<i>66,0</i>	99 106	43,0	87 97	23,0	134 129
Holzpräferenz-szenario	Verwertbares Rohholzpotezial, inklusive Totholz (zum Vergleich)	100,3	151 161	64,8	131 146	35,5	206 198
	Verwertbares Rohholzpotezial, abzüglich Totholz	95,8	144 154	62,0	126 140	33,8	197 189
Naturschutz-präferenzs.	Verwertbares Rohholzpotezial, inklusive Totholz (zum Vergleich)	75,0	113 121	51,1	103 115	23,9	139 134
	Verwertbares Rohholzpotezial, abzüglich Totholz	<i>63,8</i>	96 103	44,4	90 100	19,4	113 108

¹ Werte sind *fettgedruckt und kursiv*, wenn sie die komplette Inlandsverwendung, und nur *kursiv*, wenn sie nur die Waldholznutzung abdecken. Ohne Kennzeichnung unterschreiten sie beide Kenngrößen.

² Basis der jeweils oberen Prozentwertberechnung ist die Inlandsverwendung, Basis der jeweils unteren die Waldholznutzung.

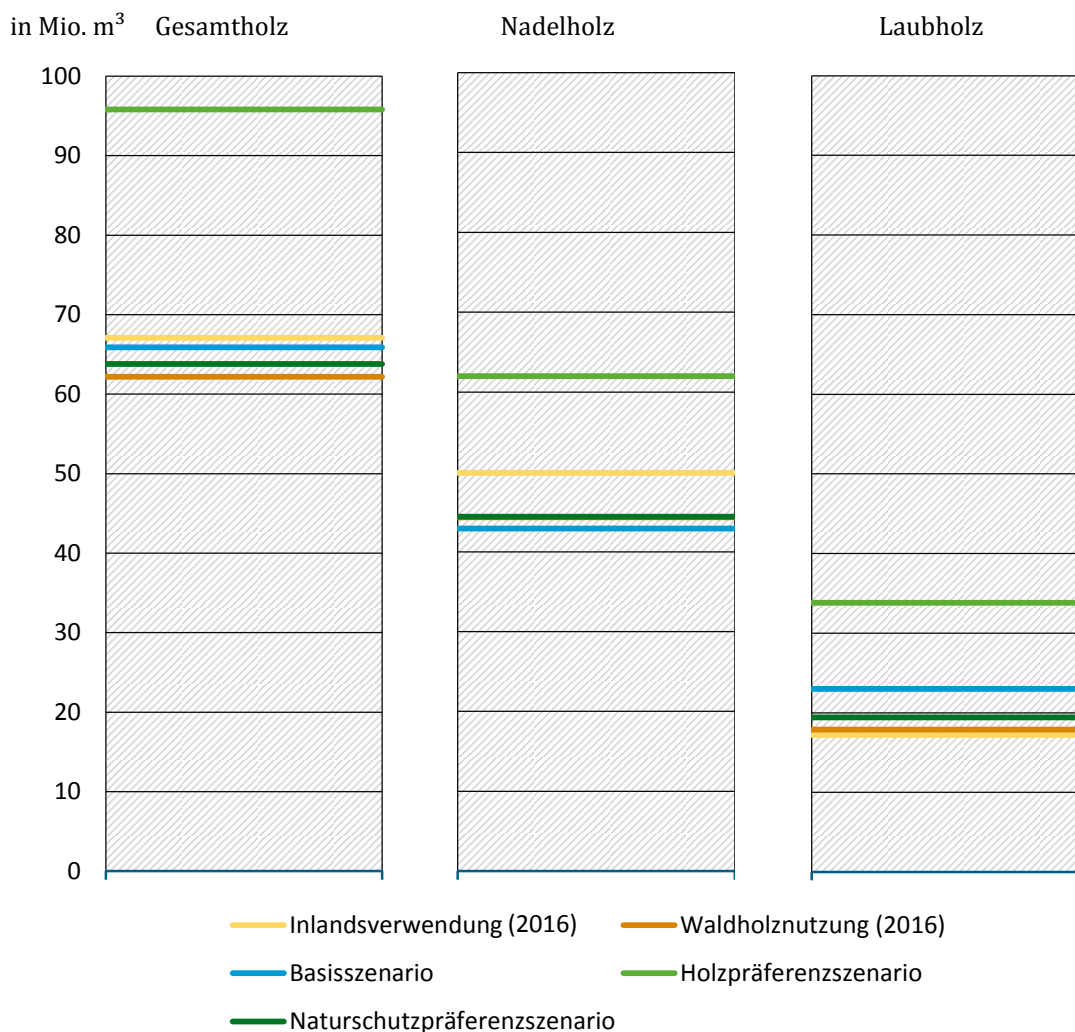
Daten und Quellen: Döring et al. (2017), FNR (2018b), Schier und Weimar (2017)

Bei der Betrachtung der Inlandsverwendung zeigen die Szenarien unterschiedliche Ergebnisse. Im Fall des Holzpräferenzszenarios übersteigt das verwertbare Potenzial sowohl für Nadel- als auch für Laubholz die Inlandsverwendung deutlich. Ein Import von Holz ist nicht erforderlich. Beim Basis- und Naturschutzszenario ist jeweils nur das Laubholzpotezial ausreichend groß, um die Inlandsverwendung abzudecken. Das Nadelholzpotezial ist jeweils zu gering, um auf den Import von Holz bei gegebener konstanter Verwendung verzichten zu können. Beim Basis-szenario ist jedoch das Gesamtholzpotezial annähernd groß genug, um die Inlandsverwendung zu decken. Eine geringfügige Substitution des fehlenden Nadelholzpotezials durch Laubholz würde daher einen Verzicht auf Holzimporte ermöglichen. Beim Naturschutz-präferenzszenario reicht das Laubholzpotezial hingegen nicht aus, um das zu niedrige Nadel-

holzpotezial auszugleichen. Hier besteht Importbedarf, jedoch insgesamt in einer etwas niedrigeren Größenordnung als in der Holzbilanz des Jahres 2016 ausgewiesen.

Eine grafische Gegenüberstellung der inländischen Derbholzverwendung sowie der Waldholznutzung des Jahres 2016 mit den Derbholzpotenzialen der WEHAM-Szenarien findet sich in der folgenden Abbildung 34.³⁵ Es zeigen sich die oben beschriebenen Ergebnisse.

Abbildung 34: Gegenüberstellung Inlandsverwendung, Waldnutzung und mittleres Derbholzpotenzial (nur verwertbar, nach Abzug Totholzvorrat)



Hinweis: Beim Nadelholz liegen die Linien für die Waldholznutzung und das Naturschutzpräferenzszenario aufgrund fast gleicher Zahlenwerte übereinander.

Daten: Tabelle 17 (Döring et al. (2017) sowie Schier und Weimar (2017)

Die Darstellungsweisen von Tabelle 17 und Abbildung 34 wurden für eine gute Vergleichbarkeit an die entsprechenden Gegenüberstellungen in FNR (2018b) angelehnt. Gegenüber den Ergebnissen in FNR (2018b) zeigen sich im vorliegenden Bericht geringere zusätzliche Derbholzverwendungspotenziale, da die verwertbaren und um die Totholzzielvorräte bereinigten Derbholzpotenziale ausgewertet wurden.

³⁵ Angaben zum zeitlichen Verlauf der Inlandsverwendung von 2010-2016 lassen sich FNR (2018b) entnehmen. Beim Nadelholz gab es über diesen Zeitraum eine geringfügige Abnahme, beim Laubholz annähernd Konstanz.

4 Holzimport bei Steigerung der Holzbauquote (AP 1.3 und AP 1.4)

In diesem Kapitel soll untersucht werden, in welchem Umfang Holz bei gesteigerter Holzbauquote zusätzlich aus anderen Ländern, auch des nicht-europäischen Auslands, importiert werden und welchen Qualitätsanforderungen dieses entsprechen müsste.

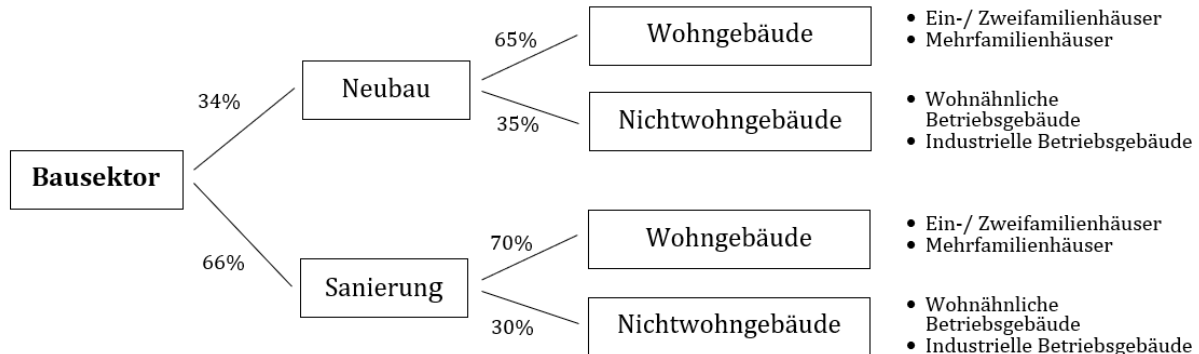
Hierfür wird zunächst untersucht, ob bei einer Steigerung der Holzbauquote zusätzliche Derbholzmengen erforderlich würden, die zu importieren wären. Darüber hinaus werden die Qualitätsanforderungen an Hölzer und die einschlägigen Waldzertifizierungssysteme beschrieben. In einem dritten Schritt werden die diesen Anforderungen entsprechenden möglichen Holzimporte analysiert und mögliche Lieferländer abgeschätzt.

4.1 Steigerung der Holzbauquote

4.1.1 Bauleistungen und Holzbauquote

Der Umfang der Bauleistungen unterscheidet sich für den Neubau- und Modernisierungs- bzw. Sanierungssektor sowie Wohn- und Nichtwohngebäudebereich erheblich. So umfasste der Neubauteil im Jahr 2016 ca. 34 % der erbrachten Bauleistungen, der Modernisierungssektor hingegen ca. 66 %. Von den im Neubaubereich erbrachten Leistungen entfielen ca. ein Drittel auf Nichtwohngebäude und ca. zwei Drittel auf Wohngebäude. Bei den Arbeiten an bestehenden Gebäuden sind die Verhältnisse ähnlich.³⁶

Abbildung 35: Bauleistungen nach Sektoren, Stand 2016



Quelle: DIW (2017), Darstellung entsprechend Hafner et al. (2017)

Wenn von einer Steigerung der Holzbauquote die Rede ist, bezieht sich dies häufig auf eine Erhöhung des Holzanteils bei der Errichtung von Neubauten oder die Erhöhung der Anzahl von Neubauten in Holzbauweise.³⁷ Dies aufgreifend gibt Tabelle 18 den Anteil an fertiggestellten Wohnungen in Ein- und Zweifamilienhäusern (EZFH) und Mehrfamilienhäusern (MFH) sowie fertiggestellten Nichtwohngebäuden (NWG) in überwiegender Holzbauweise an der jeweiligen Gesamtzahl der fertiggestellten Wohnungen bzw. Gebäude für die Jahre 2015 bis 2017 an. Um die Entwicklung aufzuzeigen, wird außerdem das Jahr 2002 mit ausgewiesen. Der Anteil von

³⁶ Vgl. DIW (2017)

³⁷ In Hafner et al. (2017) wird z. B. das Einsparpotenzial an Treibhausgas bei Erhöhung der Holzbauquote von Wohngebäuden untersucht. Hierfür werden verschiedene Holzverwendungsszenarien definiert. Ein Szenario sieht vor, dass in allen Bundesländern die Holzbauquote für Ein- und Zweifamilienhäuser sowie Mehrfamilienhäuser erreicht werden soll, die im Bundesland mit der höchsten Holzbauquote existiert. Ein zweites Szenario sieht eine Steigerung im EZFH-Bereich nach schwedischem Vorbild auf 55 % und im Bereich von MFH auf 15 % vor.

Wohnungen bzw. Gebäuden in Holzbauweise umfasst derzeit für EZFH und NWG mit ca. 17 % bis 19 % eine ähnliche Größenordnung. Für MFH liegt der Anteil mit ca. 3 % deutlich darunter. Auch wenn die Anteile insgesamt noch relativ gering sind, hat die Anzahl von Holzneubauten gegenüber 2002 deutlich zugenommen.

Allerdings zeigt Abbildung 35, dass der Großteil der Bauleistungen im Modernisierungs- bzw. Sanierungsbereich und nicht im Neubau erbracht wird. Auch etwa zwei Drittel des im Bauwesen eingesetzten Holzes wird bei Sanierungen und Modernisierungen verwendet (siehe unten stehende Abbildung 37). Darüber hinaus kommt Holz auch in Gebäuden in hybrider Bauweise zum Einsatz, deren statistische Zuordnung nicht eindeutig ist, und im Innenausbau von Gebäuden in mineralischer Bauweise. Um all diese Verwendungsbereiche zu erfassen, wird im Folgenden unter der Erhöhung der Holzbauquote die Erhöhung des Holzanteils über alle Bauleistungen verstanden und nicht nur die Erhöhung der Anzahl von Neubauten in Holzbauweise.

Tabelle 18: Prozentualer Anteil der Anzahl der Wohnungen bzw. Gebäude in überwiegender Holzbauweise an Fertigstellungen

	2002	2015	2016	2017
EZFH	13,0 %	17,4 %	17,8 %	18,8 %
MFH	2,1 %	2,3 %	2,7 %	2,7 %
NWG	14,1 %	17,8 %	17,3 %	17,3 %

Daten: Statistisches Bundesamt (2018b)

4.1.2 Entwicklung der Holzverwendung im Bausektor und Steigerungspotenzial der Holzbauquote

Die Menge des in Deutschland im Bausektor verwendeten Holzes ist ansteigend. Dabei kommt vor allem Nadelholz in Form von Schnittholz zum Einsatz. Die beiden folgenden Abbildungen geben die verwendeten Holzarten, Faserrohstoffe und Holzhalbwaren nach Baubereichen und ihre jeweiligen Anteile für das Jahr 2012 wieder.³⁸ Wie auch schon in Kapitel 1.1 aufgeführt, wurden im Jahr 2012 insgesamt 13,4 Mio. m³ Holz im Baubereich eingesetzt (Abbildung 36 und Abbildung 37).³⁹ Hierfür bedurfte es eines Einsatzes von 12,5 Mio. m³ Waldholz (Abbildung 38), da neben Schnittholz grundsätzlich auch Sägenebenprodukte und Altholz in Holzprodukten Verwendung finden.⁴⁰

³⁸ Aktuellere Zahlen lagen in dieser Form nicht vor.

³⁹ Die für die Angabe des Holzeinsatzes im Bauwesen verwendete Einheit ist m³(b). Dieses sogenannte „Baukubikmeteräquivalent“ gibt die Kubikmeter an, die ein Produkt im Gebäude einnimmt.

⁴⁰ Vgl. Mantau et al. (2013)

Abbildung 36: Baubereiche nach Holzarten, Stand 2012

in 1.000 m ³ (b)	Holzarten							
	Nadelholz		Laubholz		Tropenholz		Insgesamt	
	Summe	%	Summe	%	Summe	%	Summe	%
Eigenheime	2.979	88,7	324	9,7	54	1,6	3.356	100
Mehrfamilienhäuser	417	82,0	85	16,7	7	1,3	509	100
Modernisierungen	5.622	82,5	1.047	15,4	149	2,2	6.817	100
Wohnungsbau insgesamt	9.018	84,4	1.456	13,6	209	2,0	10.683	100
Wohnähnliche Betriebsgebäude	268	84,6	47	14,7	2	0,7	317	100
Industriegebäude	651	95,1	31	4,5	3	0,4	684	100
Modernisierungen	1.539	89,3	162	9,4	23	1,4	1.725	100
Nichtwohnungsbau insgesamt	2.458	90,2	239	8,8	28	1,0	2.726	100
Insgesamt	11.476	85,6	1.696	12,6	237	1,8	13.409	100

Quelle: Mantau et al. (2013)

Abbildung 37: Verwendete Holzhalbwaren nach Baubereichen, Stand 2012

in 1.000 m ³ (b)	Wohnungsbau				Nichtwohnungsbau				Hochbau	
	Neubau		Moder- nisierung		Neubau		Moder- nisierung		Insgesamt	
	Summe	%	Summe	%	Summe	%	Summe	%	Summe	%
Schnittholz	2.386	61,7	3.779	55,4	728	72,7	1.186	68,8	8.079	60,2
Spanplatte	53	1,4	149	2,2	16	1,6	44	2,5	262	2,0
MDF / HDF	52	1,3	734	10,8	7	0,7	27	1,6	820	6,1
OSB	158	4,1	129	1,9	51	5,1	153	8,9	492	3,7
LDF	637	16,5	1.090	16,0	90	9,0	85	4,9	1.902	14,2
Furnier	22	0,6	99	1,4	3	0,3	9	0,5	133	1,0
Sperrholz	47	1,2	83	1,2	16	1,6	8	0,5	154	1,2
Sonstiges	510	13,2	755	11,1	91	9,0	212	12,3	1.568	11,7
Insgesamt	3.866	100	6.818	100	1.002	100	1.725	100	13.409	100

Quelle: Mantau et al. (2013)

Abbildung 38: Verwendete Faserrohstoffe (Verbaut und Verschnitt), Stand 2012

in 1.000 m ³ (s)	Faserrohstoffe									
	Waldholz		Sägeneben- produkte		Altholz		Sonstiges		Insgesamt	
	Summe	%	Summe	%	Summe	%	Summe	%	Summe	%
Schnittholz	10.309	82,2	0	0,0	0	0,0	0	0,0	10.309	63,1
Spanplatte	86	0,7	215	10,3	93	100,0	11	0,7	405	2,5
MDF / HDF	1.120	8,9	547	26,2	0	0,0	93	5,7	1.760	10,8
OSB	657	5,2	0	0,0	0	0,0	62	3,8	719	4,4
LDF	0	0,0	1.328	63,6	0	0,0	0	0,0	1.328	8,1
Furnier	170	1,4	0	0,0	0	0,0	0	0,0	170	1,0
Sperrholz	204	1,6	0	0,0	0	0,0	0	0,0	204	1,2
Sonstiges	0	0,0	0	0,0	0	0,0	1.453	89,8	1.453	8,9
Insgesamt	12.546	100	2.089	100	93	100	1.618	100	16.347	100

Quelle: Mantau et al. (2013)

Auch wenn die Holzeinsatzmengen im Baubereich seit 2012 gestiegen sind – im Jahr 2015 wurden bereits 16,4 Mio. m³ Holz im Bausektor verwendet⁴¹ –, kann davon ausgegangen werden, dass die grundsätzliche Verwendungsstruktur seitdem annähernd gleichgeblieben ist. Unter dieser Voraussetzung lässt sich für das Jahr 2015 ein Waldholzeinsatz im Baubereich von ca. 15,3 Mio. m³ abschätzen. Da in den verwendeten Literaturquellen für das Jahr 2012 keine Angabe des Waldholzeinsatzes getrennt nach Nadel- und Laubholz (sowie Tropenholz) enthalten ist, kann keine Unterscheidung des geschätzten Waldholzeinsatzes nach Nadel- und Laubholz erfolgen.

Wie in Kapitel 3.3 gezeigt wurde, könnte der Umfang der Waldholznutzung des Jahres 2016 für alle drei Waldbehandlungsszenarien auch zukünftig beibehalten werden, ohne dass eine Steigerung des Holzimports erforderlich wäre. Je nach Szenario und Holzartengruppe wäre der Holzbedarf sogar auch vollständig aus inländischem Potenzial zu decken. Aus der Differenz zwischen Rohholzpotezial und Verwendung (Waldholznutzung) lässt sich je Szenario die ohne eine Erhöhung der Importmenge theoretisch mögliche Steigerung der Derbholzverwendungsquote ableiten (Tabelle 19). Diese Steigerungsrate könnte bei gleichbleibender Holzverwendungsstruktur einheitlich für jeden derbholzverwendenden Wirtschaftsbereich zugrunde gelegt werden.

Bezieht man das Mengenpotenzial ausschließlich auf den Baubereich, erhält man die theoretisch mögliche Steigerung der Holzbauquote (Tabelle 20). Diese beträgt beim Basisszenario etwa 25 %, beim Holzpräferenzszenario etwa 220 % und beim Naturschutzpräferenzszenario etwa 11 %. Basis für die Berechnung des Steigerungspotenzials der Holzbauquote ist mangels eines aktuellen Werts für den baubereichsbezogenen Gesamtwaldholzeinsatz der oben angegebene Schätzwert für 2015. Der Berechnung liegt als Voraussetzung zugrunde, dass alle anderen derbholzverbrauchenden Wirtschaftsbereiche ihre Verwendung konstant halten. Darüber hinaus ist zu berücksichtigen, dass es sich bei den Angaben zum Rohholzpotezial um mit entsprechenden Unsicherheiten behaftete Simulationswerte handelt.

Tabelle 19: Mittleres Steigerungspotenzial der Waldholznutzung für die Periode 2013-2052

Angabe des gegenüber 2016 jährlich im Mittel zusätzlich zur Verfügung stehenden Holzvolumens

Mittleres jährliches Steigerungspotenzial der Waldholznutzung (Derbholz)	Summe		Nadelholz		Laubholz	
	Mio. m ³	%	Mio. m ³	%	Mio. m ³	%
Basisszenario	3,8	6,1	-1,3	-3,0	5,1	28,5
Holzpräferenzszenario	33,6	54,0	17,7	40,0	15,9	88,8
Naturschutzpräferenzszenario	1,6	2,6	0,1	0,2	1,5	8,4

Daten: Tabelle 17

⁴¹ Vgl. Mantau et al. (2017)

Tabelle 20: Theoretisches mittleres Steigerungspotenzial der Holzbauquote für die Periode 2013-2052 (ohne Steigerungen in anderen Wirtschaftsbereichen)

Mittleres Steigerungspotenzial der Holzbauquote	Summe Holz	
	Mio. m ³ (jährlich)	%
Basisszenario	3,8	25
Holzpräferenzszenario	33,6	220
Naturschutzpräferenzszenario	1,6	11

Basis der Prozentberechnung: Schätzwert für den Waldholzeinsatz im Bauwesen, Stand 2015, in Höhe von 15,3 Mio. m³

Daten: Tabelle 17 sowie Tabelle 19

Die in Tabelle 20 berechneten Steigerungspotenziale der Holzbauquote sind als unrealistisch hoch zu beurteilen, da die zugrunde liegende Voraussetzung, dass sämtliches zusätzlich vorhandenes Rohholzpotenzial allein dem Baubereich zur Verfügung steht, nicht wirklichkeitsnah ist. Die Entwicklungen in den übrigen Holzendwarenssektoren wie dem Verpackungs-, Papier-, Möbel- und nicht zuletzt dem Energiesektor haben erheblichen Einfluss auf die Gesamtholznachfrage. Aus diesem Grund wurden im WEHAM-Szenarien-Forschungsprojekt drei Holzverwendungsszenarien (Referenz-, Förder- und Restriktionsszenario) erarbeitet, denen verschiedene Entwicklungen der Holznachfrage in den relevanten Endwarenssektoren zugrunde liegen. Dabei wird im Referenzszenario eine Entwicklung angenommen, die als am wahrscheinlichsten angesehen und sehr stark von bisherigen Entwicklungen beeinflusst wird.⁴²

Die den Szenarien zugrundeliegenden Entwicklungsannahmen sind in Tabelle 21 zusammengestellt. Die dort zur Verwendung angesetzten Holzvolumina umfassen neben Derbholz auch die übrigen zur Holzproduktherstellung eingesetzten Holzrohstoffe wie Altholz oder Sägenebenprodukte. Für die Steigerung der Holzbauquote werden im Referenzszenario 34 %, im Förderszenario 41 % und im Restriktionsszenario 25 % angenommen, was zum Teil über, zum Teil unter den in Tabelle 20 berechneten theoretisch möglichen Steigerungsraten auf Basis des Derbholzpotenzials von 11 % bis 220 % liegt.

⁴² Vgl. Mantau et al. (2017)

Tabelle 21: WEHAM-Holzverwendungsszenarien

Referenzszenario	Förderszenario	Restriktionsszenario
Moderate Substitution von Nicht-Holzprodukten durch Holzprodukte: Holzeinsatz im Bauwesen steigt bis 2030 um 5,5 Mio. m ³ bzw. 34 %	Deutliche Steigerung der Holzbauweisen: Anstieg bis 2030 um 6,8 Mio. m ³ bzw. 41 %	Geringere Steigerung der Holzbauweisen: Anstieg bis 2030 um 4,1 Mio. m ³ bzw. 25 %
Wärmemarkt wird wieder weiter gefördert, reduziert sich jedoch langfristig: energetischer Holzeinsatz steigt bis 2030 um 5,2 Mio. m ³ bzw. 8 %	EEG-Förderung wird in der Art fortgesetzt, dass der derzeitige Anlagenbestand erhalten bleibt: Anstieg bis 2030 um 12,7 Mio. m ³ bzw. 20 %	EEG-Förderung fällt weg: Absinken der energetischen Holznutzung bis 2030 um 6,9 Mio. m ³ bzw. 11 %
Konjunkturelle Zuwächse und moderat steigende Holznachfrage im Verpackungssektor : Holzeinsatz steigt bis 2030 um 1,4 Mio. m ³ bzw. 18 %	Steigende Holznachfrage im Verpackungssektor: Holzeinsatz steigt bis 2030 um 1,8 Mio. m ³ bzw. 23 %	Gering steigende Holznachfrage im Verpackungssektor: Holzeinsatz steigt bis 2030 um 0,9 Mio. m ³ bzw. 12 %
Moderater Anstieg des Holzeinsatzes im Möbelsektor um 2,1 Mio. m ³ bzw. 22 %	Stärkerer Anstieg des Holzeinsatzes im Möbelsektor um 2,7 Mio. m ³ bzw. 28 %	Moderater Anstieg des Holzeinsatzes im Möbelsektor um 1,6 Mio. m ³ bzw. 17 %
Stabile Entwicklung im Papiersektor : Anstieg des Holzeinsatzes um 0,3 % p.a. ¹	Entwicklung im Papiersektor wie im Referenzszenario	Entwicklung im Papiersektor wie im Referenzszenario
Gesamtsteigerung Holzeinsatz: 14,2 Mio. m³ (zzgl. Papiersektor)	Gesamtsteigerung Holzeinsatz: 24,0 Mio. m³ (zzgl. Papiersektor)	Veränderung Holzeinsatz: - 0,3 Mio. m³ (zzgl. Papiersektor)

¹ In der verwendeten Quelle wurde keine Angabe gemacht, welcher absoluten Holzmenge die prozentuale Steigerung im Papiersektor entspricht. Sie konnte auch nicht aus anderen Größen abgeleitet werden.

Quelle: Mantau et al. (2017)

Welcher Rohholzeinsatz für den jeweiligen Holzeinsatz in den drei Nutzungsszenarien im Mittel über die Betrachtungsperiode erforderlich ist, wird in der verwendeten Literaturquelle nicht angegeben. Somit ist es nicht möglich, durch Gegenüberstellung des jeweiligen Holzeinsatzes mit den in den drei Waldbehandlungsszenarien berechneten Werten des Derbholzpotenzials direkte Rückschlüsse auf Steigerungspotenziale zu ziehen.

Jedoch wurde im WEHAM-Projekt ausgehend von den Waldbehandlungs- und Nutzungsszenarien mit Hilfe des globalen Holzmarktmodells GFPM (Global Forest Products Model) untersucht, wie sich Änderungen der inländischen Nachfrage nach Holzprodukten oder Änderungen des inländischen Rohholzangebots auf den nationalen Holzmarkt auswirken könnten. Das GFPM ist ein partielles Gleichgewichtsmodell, das Produktion, Handel und Konsum von Rohholz und Holzwaren global abbildet und für die WEHAM-Fragestellungen weiterentwickelt wurde. Das in den Waldbehandlungsszenarien errechnete Rohholzpotenzial fungierte als Grenze für eine national zu realisierende Produktionsmenge an Holz für die stoffliche Nutzung in einer Simulationsperiode. Nicht abgeschöpfte Potenzialmengen eines Zeitraums erhöhten die Potenzialmengen

der Folgeperioden, sodass nicht genutzte Potenziale der Vorjahre dem Markt in den Folgejahren als „stehendes Lager“ und somit als zusätzliches Holzerntep Potenzial zur Verfügung standen.⁴³

Für die Analysen im Holzmarktmodell wurden aus den Waldbehandlungs- und Holzverwendungszenarien folgende drei Kombinationen gebildet:

- ▶ Basisszenario – Referenzszenario (BAS-REF)
- ▶ Holzpräferenzszenario – Förderszenario (HPS-FÖR)
- ▶ Naturschutzpräferenzszenario – Restriktionsszenario (NPS-RES).

Abbildung 39 zeigt die Ergebnisse der Untersuchungen und stellt für Nadel- und Laubholz Produktion und Nachfrage für die stoffliche Nutzung gegenüber. Die stoffliche Nutzung beinhaltet jenen Teil des Waldholzes, der industriell genutzt werden kann. Hierfür werden vom Gesamtrohholzpotezial die angestrebte Totholzmenge sowie der im Szenarium erwartete Holzanteil zur energetischen Nutzung abgezogen. Die Gegenüberstellung zeigt, dass die Nachfrage nach Nadelrohholz in allen untersuchten Szenarien-Kombinationen das Angebot übersteigt und zu steigenden Nadelrohholz-Importen führt. Die der Modellierung zugrunde gelegten Holzverwendungszuwächse für Nadelholz können somit nicht vom einheimischen Rohholzpotezial abgedeckt werden. Die zu importierenden Nadelrohholzmengen lassen sich anhand Abbildung 39 abschätzen und sind für das Szenario BAS-REF am größten.⁴⁴ Aus den Berechnungsergebnissen lässt sich nicht ableiten, welche Steigerung der Holzbauquote bei vorgegebenen Steigerungsraten der anderen Endwarenssektoren möglich wäre, ohne Nadelholz importieren zu müssen. Eine Berechnung erscheint jedoch möglich und könnte bei den Erstellern der Studie abgefragt werden.

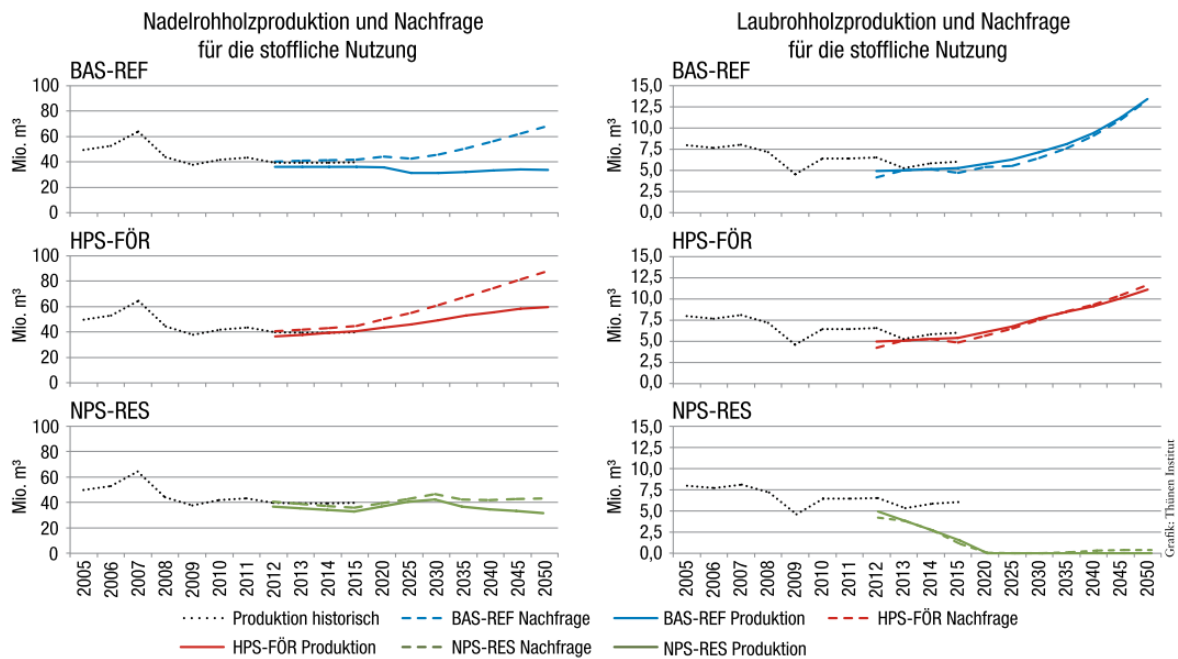
Es stellt sich darüber hinaus die Frage, ob es andere sinnvolle Kombinationen von Waldbehandlungs- und Nutzungszenarien gibt, die möglicherweise zu einem anderen Ergebnis führen. Denkbar wären die Kombinationen BAS-RES sowie HPS-RES. Diese würden unter Nutzung aller geeigneten Arten von Holzrohstoffen eine Steigerung der Holzbauquote von 25 % beinhalten. Die Ergebnisse aus Abbildung 39 lassen vermuten, dass in beiden Fällen kein Nadelholzimport erforderlich wäre. Allerdings müsste dies anhand des GFPM-Modells untersucht werden, um die relevanten Marktwirkungen zu erfassen.

Für Laubholz stellt sich die Situation anders als für Nadelholz dar. Angebot und Nachfrage sind annähernd deckungsgleich, der Außenhandelsaldo ist etwa ausgeglichen. In einigen Szenarien muss lediglich geringfügig Laubrohholz importiert werden.

⁴³ Vgl. Schier und Weimar (2017 und 2018)

⁴⁴ Vgl. Schier und Weimar (2017 und 2018)

Abbildung 39: Gegenüberstellung der Szenarienergebnisse zu Entwicklungen der inländischen Produktion und des Verbrauchs von Nadel- und Laubrohholz



Quelle: Schier und Weimar (2017)

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass sich aus den zur Verfügung stehenden Literaturangaben nicht ableiten lässt, welche Holzbausteigerungsquote mit dem je Waldbehandlungsszenario zur Verfügung stehenden Derbholzpotezial umsetzbar wäre, ohne dass Nadelholz zu importieren ist. Dementsprechend ist aus den Forschungsergebnissen auch nicht ableitbar, in welchem Umfang Holz bei beliebig vorgegebener Steigerung der Holzbauquote zu importieren wäre. Hierfür wären weitere Untersuchungen erforderlich.

4.2 Qualitätsanforderungen an zu importierendes Holz (Zertifizierungssysteme)

Als Mindestanspruch an die Qualität zu importierenden Holzes können die im Beschaffungserlass für Holzprodukte des Bundes genannten Anforderungen angesehen werden. Hierin legt die Bundesregierung fest, dass sie die Zertifizierung nachhaltig bewirtschafteter Wälder unterstützt und bei ihren Beschaffungsmaßnahmen nur Holz aus zertifizierten Beständen und legalem Holzschlag bezieht. Damit soll sichergestellt werden, dass Holzprodukte, die durch die Bundesverwaltung beschafft werden, nachweislich aus legaler und nachhaltiger Waldbewirtschaftung stammen. Der Nachweis ist vom Bieter durch Vorlage eines Zertifikats von FSC (Forest Stewardship Council), PEFC (Programme for the Endorsement of Forest Certification schemes), eines vergleichbaren Zertifikats oder durch Einzelnachweise zu erbringen. Vergleichbare Zertifikate oder Einzelnachweise werden anerkannt, wenn vom Bieter nachgewiesen wird, dass die für das jeweilige Herkunftsland geltenden Kriterien des FSC oder PEFC erfüllt werden.

Die Zertifizierungssysteme FSC und PEFC umfassen jeweils einen umfangreichen Katalog von Nachhaltigkeitskriterien, die für ein Waldzertifikat einzuhalten sind, unterscheiden sich jedoch hinsichtlich Inhalt und Struktur deutlich. Beide Systeme erkennen weltweit bestehende forstwirtschaftliche Zertifizierungssysteme an, sofern sie die auf internationaler Ebene festgelegten Mindeststandards des jeweiligen Systems erfüllen. Hieraus resultieren landesspezifische unterschiedliche Anforderungsniveaus. Insbesondere der PEFC-Standard wird von Umweltverbänden

regelmäßig als nicht ausreichend anspruchsvoll und unabhängig kritisiert. Nachfolgende Tabelle listet überblicksartig wesentliche Nachhaltigkeitskriterien beider Systeme auf.

Tabelle 22: Zertifizierungssysteme für nachhaltige Waldbewirtschaftung im Überblick

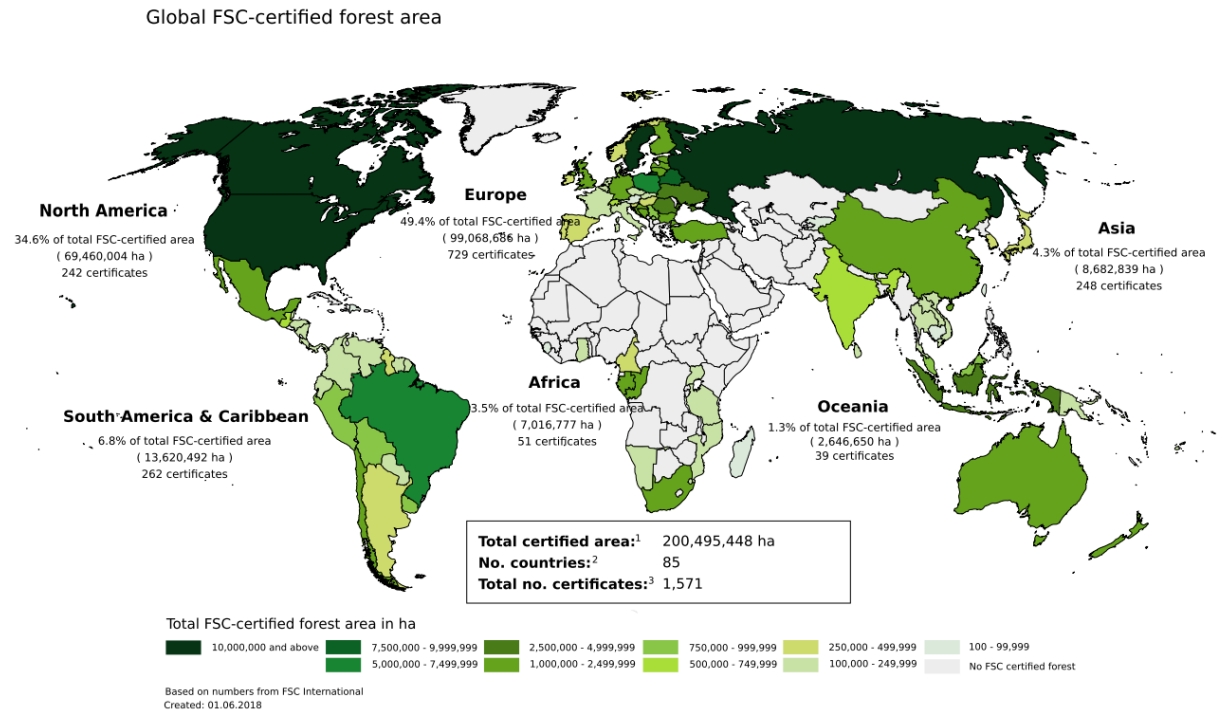
FSC	PEFC
Nachhaltigkeitskriterien	
<ul style="list-style-type: none"> ▶ Einhaltung der Gesetze und FSC-Prinzipien ▶ Besitzansprüche, Landnutzungsrechte und Verantwortlichkeiten (Dokumentation und rechtliche Verankerung) ▶ Rechte indigener Völker (Anerkennung und Respektierung gewohnheitsmäßiger Rechte) ▶ Beziehungen zur lokalen Bevölkerung und Arbeitnehmerrechte (soziales und ökonomisches Wohlergehen im Wald Beschäftigter) ▶ Nutzen aus dem Walde (Förderung der effizienten Nutzung der Produkte und Leistungen des Waldes) ▶ Auswirkungen auf die Umwelt (Erhaltung von biologischer Vielfalt, Wasserressourcen, etc.) ▶ Bewirtschaftungsplan (Erstellung, Anwendung und Aktualisierung) ▶ Kontrolle & Bewertung (Angemessenen Dokumentation und Bewertung) ▶ Erhaltung von Wäldern mit hohem Schutzwert (vorbeugende Herangehensweise) ▶ Bewirtschaftung von Plantagen (gemäß Prinzipien) 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Gesetzliche und andere Anforderungen (Einhaltung internationaler Konventionen sowie nationaler Gesetze und vertraglicher Verpflichtungen) ▶ Forstliche Ressourcen (z.B. Bewirtschaftungspläne, dauerhafte Bewaldung) ▶ Gesundheit und Vitalität des Waldes (z.B. Verzicht auf Pflanzenschutz- und Düngemittel, Vermeidung von Waldschäden) ▶ Produktionsfunktion der Wälder (z.B. Wertschöpfung und wirtschaftlicher Erfolg, Holzqualität, bedarfsgerechte Erschließung) ▶ Biologische Vielfalt im Waldökosystem (z.B. Mischbestände/Standortgerechtigkeit, Förderung seltener Arten, keine Gentechnik) ▶ Schutzfunktionen der Wälder (z.B. keine Gewässerbeeinträchtigung, keine flächige Bodenbearbeitung) ▶ Sozioökonomische Funktionen der Wälder (z.B. Qualifikation von Arbeitern, Zertifizierung von Unternehmen)

Quelle: Pohl (2017)

Aufgrund der geringeren Kosten und leichteren Umsetzbarkeit ist derzeit weltweit deutlich mehr Waldfläche nach PEFC als nach FSC zertifiziert (313 Mio. ha resp. 200 Mio. ha). Abbildung 40 und Abbildung 41 geben Auskunft über die von beiden Systemen aktuell international zertifizierten Waldflächen.

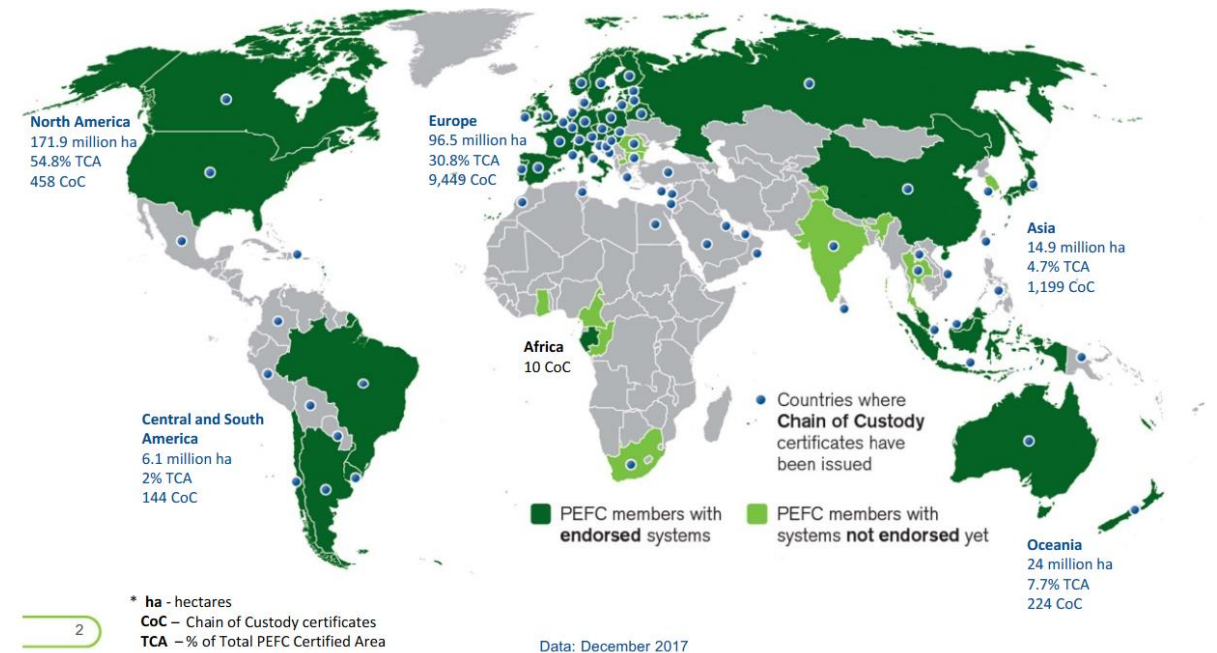
Tabelle 23 listet für die gleichen Erfassungszeitpunkte für beide Systeme die 25 Länder mit den jeweils größten zertifizierten Waldflächen einschließlich Angabe der entsprechenden Anteile auf. Da je Land unterschiedlich große Flächenanteile nach den Systemen zertifiziert sind, sind insgesamt 35 Länder aufgeführt. Für FSC sind in der Tabelle ca. 95 %, für PEFC ca. 99 % der zertifizierten Flächen erfasst.

Abbildung 40: Weltweit FSC-zertifizierte Waldfläche, Stand 01.06.2018



Quelle: FSC (2018)

Abbildung 41: Weltweit PEFC-zertifizierte Waldfläche, Dezember 2017



Quelle: PEFC (2017)

Tabelle 23: Anteile zertifizierter Waldflächen ausgewählter Länder weltweit

Region	Land	Anteil Waldfläche [%]	Waldfläche [1.000 ha]	FSC-zertifizierte Fläche [1.000 ha]	Anteil FSC-zertifiziert [%]	PEFC-zertifizierte Fläche [1.000 ha]	Anteil PEFC-zertifiziert [%]
Afrika	Gabun	89	23.903	2.042,6	8,5	0	0
	Kongo, D.R.	67	151.893	2.410,7	1,6	0	0
	Süd-Afrika	8	9.705	1.499,3	15,4	0	0
Asien	China	22	207.343	1.109,4	0,5	5.759,7	2,8
	Indonesien	51	92.390	2.829,3	3,1	3.662,5	4,0
	Japan	68	24.790	403,6	1,6	1.333,2	5,4
	Malaysia	68	22.328	755,6	3,4	4.120,1	18,5
Europa	Bosnien Herz.	43	2.186	1.654,5	75,7	0	0
	Bulgarien	35	3.800	1.465,2	38,6	0	0
	Deutschland	33	11.514	1.156,1	10,0	7.424,2	64,5
	Estland	53	2.247	1.486,6	66,2	1.217,6	54,2
	Finnland	73	22.184	1.611,2	7,3	17.784,5	80,2
	Frankreich	31	16.974	56,2	0,3	8.096,1	47,7
	Großbritannien	13	3.145	1.604,1	51,0	1.409,8	44,8
	Lettland	54	3.358	1.044,6	31,1	1.700,9	50,7
	Litauen	35	2.193	1.139,5	52,0	0	0
	Norwegen	33	12.053	444,8	3,7	7.380,8	61,2
	Österreich	47	3.879	0,6	0,0	3.111,1	80,2
	Polen	31	9.492	6.932,9	73,0	7.252,2	76,4
	Rumänien	30	6.902	2.726,2	39,5	0	0
	Russ. Förderat.	50	818.844	46.597,2	5,7	13.181,0	1,6
	Schweden	69	28.104	12.237,3	43,5	11.549,7	41,1
	Slowakei	40	1.923	146,4	7,6	1.229,3	63,9
	Spanien	37	18.508	269,6	1,5	2.153,4	11,6
Tschechien	35	2.702	53,3	2,0	1.811,4	67,0	
Türkei	15	11.544	2.387,9	20,7	0	0	
Ukraine	17	10.082	4.141,3	41,1	0	0	
Weißrussland	43	8.823	8.754,7	99,2	8.710,2	98,7	
Nord-Amerika	Kanada	38	345.553	53.861,0	15,6	138.148,3	40,0
	Mexiko	34	66.094	1.164,4	1,8	0	0
	USA	34	311.012	14.434,5	4,6	33.748,4	10,9
Ozeanien	Australien	16	122.917	1.218,7	1,0	23.656,6	19,2
	Neuseeland	39	10.269	1.265,6	12,3	434,2	4,2
Süd-Amerika	Brasilien	59	493.130	6.606,7	1,3	3.591,0	0,7
	Chile	23	17.101	2.316,2	13,5	1.908,7	11,2

Kroatien wird ebenfalls mit großen FSC-zertifizierten Waldflächen aufgeführt, jedoch aufgrund einer fehlerhaft erscheinenden Angabe nicht in die Tabelle übernommen.

Daten: FSC (2018), PEFC (2017), Statistisches Bundesamt (2017)

4.3 Holzimporte

In diesem Kapitel wird der Import von Hölzern untersucht und potenzielle Lieferländer für eine steigende Holzbauquote abgeschätzt. Kapitel 4.1 illustriert, dass eine Abschätzung der möglichen Steigerung der Holzbauquote nicht eindeutig getroffen werden kann. Die Steigerung ist abhängig von der Entwicklung der Nachfrage nach Holz aus allen Sektoren und lässt sich ohne zusätzliche Untersuchungen nicht quantifizieren (siehe Kapitel 4.1.2). Die Ergebnisse der Waldbehandlungs- und Holzverwendungsszenarien zur Entwicklung der inländischen Produktion und des Verbrauchs von Nadel- und Laubholz prognostizieren jedoch, dass die Nachfrage vor allem nach Nadelhölzern über der inländischen Produktion liegt (Kapitel 4.1.2, Abbildung 39) und Importe notwendig sein werden. Bezieht man ein, dass aktuell etwa 85 % aller Holzbauprodukte nadelholzbasiert sind (Kapitel 2.2) und aktuell gemäß dem Außenhandelsaldo (Tabelle 17) 11 % des verwertbaren Nadelholzes importiert werden⁴⁵, so wird in dieser Studie davon ausgegangen, dass Holzimporte auch in Zukunft erforderlich sein werden.

Grundlage für Importe von Holz bilden für Deutschland bestehende EU-rechtliche und internationale Vereinbarungen, welche der Zerstörung von Tropenwald, dem Raubbau und dem Inverkehrbringen von illegal eingeschlagenem Holz vorbeugen. Diese Anforderungen bedienen die in Kapitel 4.2 aufgeführten Qualitätsanforderungen an Zertifikate nachhaltiger Waldwirtschaft. In diesem Zusammenhang muss unbedingt berücksichtigt werden, dass die einzelnen potenziellen Importländer unterschiedlich anspruchsvolle anerkannte Waldzertifizierungsstandards aufweisen. Daher ist individuell zu prüfen, ob die importierten Hölzer den Zertifikatsanforderungen von Deutschland gerecht werden. Importe von Holzzeugnissen in die Bundesrepublik Deutschland werden außerdem bestimmt durch die Richtlinie 2000/29 EG über Maßnahmen zum Schutz der Gemeinschaft gegen die Einschleppung und Ausbreitung von Schadorganismen der Pflanzen und Pflanzenerzeugnisse, das Pflanzenschutzgesetz (PflSchG) und die Pflanzenbeschauungsordnung (PflBeschauV 1989). Der illegale Holzeinschlag sowie die daraus resultierenden Produkte werden unterbunden durch das Holzhandels-Sicherungs-Gesetz (HolzSiG) sowie die EU-Holzhandelsverordnung (EUTR) und die Rechtsdurchsetzung, Politikgestaltung und den Handel im Forstsektor (FLEGT).

Transportaufwendungen von Holzimporten und die damit assoziierten negativen ökologischen Effekte sollen ebenfalls für eine ganzheitliche Betrachtung der Umweltauswirkungen von Holzimporten berücksichtigt werden. Unterschiedliche Studien zu Ökobilanzen von Gebäuden zeigen, dass der Transport im Vergleich zu anderen Lebenszyklusphasen des Holzbaus nur einen relativ geringen Anteil der Umweltauswirkungen verursacht (siehe Kapitel 8.4.2). Für Importe aus dem europäischen Ausland liegt der Einfluss des Transports auf die Ökobilanz von Gebäuden lediglich im niedrigen einstelligen Prozentbereich.⁴⁶ Der Import aus dem europäischen Ausland wird zudem durch den hohen Anteil zertifizierter Waldflächen (ca. 50 % der weltweiten FSC-zertifizierten Waldfläche und ca. 30 % der weltweiten PEFC-zertifizierten Waldfläche befinden sich in Europa, siehe Abbildung 40 und Tabelle 23) befürwortet. Länder wie Kanada und die USA, die zwar große zertifizierte Waldflächen aufweisen (ca. 35 % der weltweiten FSC-zertifizierten Waldfläche und ca. 55 % der weltweiten PEFC-zertifizierten Fläche, Abbildung 40 und Tabelle 23), kommen durch die hohen Transportdistanzen und damit verbundenen negativen Umweltauswirkungen für einen Holzimport nicht in Betracht. Bei Russland wären die Transportwege wegen der großen räumlichen Ausdehnung genau zu untersuchen.

⁴⁵ 2016 betrug das Außenhandelsaldo des verwertbaren Derbholzes 7,1 % (11 % Nadelholz, -4 % Laubholz)

⁴⁶ Vgl. Pohl (2017). Demnach bewegt sich der Einfluss von Transportwegen für den Import von Hölzern aus dem europäischen Ausland auf die Ökobilanz von Gebäuden im niedrigen einstelligen Prozent- und teilweise Promille-Bereich.

Importe von Rohholz erfolgen vorwiegend aus den Anrainerstaaten Deutschlands.⁴⁷ Der Holzaußenhandel Rohholz verdeutlicht, dass etwa 95 % des importierten Holzes Nadelholz ist und nur etwa 5 % Laubholz. Nadel- und Laubholz werden zu etwa 90 % aus den europäischen Staaten nach Deutschland importiert. Bei den für Holzbau aktuell hauptsächlich verwendeten Nadelhölzern sind die Anrainerstaaten Polen und Tschechien mit jeweils einem Einfuhranteil von 30 % bis 38 % die wichtigsten Lieferländer für Deutschland. Für den Anteil importierter Laubhölzer, deren Verwendung vor allem in den Holzbauweisen Holztafelbau und Massivholzbau möglich wäre (siehe Kapitel 2.2), sind vor allem Polen (mit etwa 40 %) sowie Frankreich und Niederlande (jeweils etwa 15 %) die wichtigsten Lieferländer (Tabelle 24).⁴⁸

Es ist zu berücksichtigen, dass importiertes Holz nicht mehr der Nutzung im Wuchsland zur Verfügung steht und im Herkunftsland gegebenenfalls negative ökologische Auswirkungen resultieren. Um diese Verlagerungseffekte zu vermeiden, sollte nur Holz aus Ländern importiert werden, die reich an Wald und zertifizierten Waldflächen sind, und deren Derbholzpotenzial den inländischen Bedarf übersteigt. Der inländische Bedarf und das zur Verfügung stehende Holzpotenzial von Hölzern in den europäischen Ländern werden in dieser Studie durch die Selbstversorgungsbilanz von Rundholz länderspezifisch abgeschätzt.

Tabelle 24: Holzaußenhandel von Nadelrohholz und Laubrohholz der Bundesrepublik Deutschland mit den EU-Ländern in 1.000 m³

Land	Nadelholz				Laubholz			
	2017		2018*		2017		2018*	
	Einfuhr	Ausfuhr	Einfuhr	Ausfuhr	Einfuhr	Ausfuhr	Einfuhr	Ausfuhr
Gesamtmenge	8.238	2.898	6.329	2.357	471	1.155	373	986
darunter EU (28)	7.319	2.734	5.775	2.066	425	545	326	457
Davon								
Belgien	319	343	217	300	2	38	0	21
Dänemark	229	33	146	38	5	88	3	59
Griechenland	-	-	-	-	0	0	0	0
Spanien	-	-	0	0	1	0	0	0
Frankreich	514	90	371	84	54	17	58	9
Irland	0	1	15	0	0	0	0	0
Italien	0	113	0	85	0	2	0	1
Luxemburg	119	57	90	42	0	15	0	11
Niederlande	193	34	172	52	82	18	54	11
Österreich	203	1.740	169	1.231	19	299	13	224
Portugal	-	-	-	-	0	0	0	0
Finnland	52	0	92	1	0	0	0	0

⁴⁷ Vgl. BMEL (2017b)

⁴⁸ Eine genauere Untersuchung nach den für Holzbau relevanten Holzarten ist mit den vorliegenden Statistiken nicht möglich.

Land	Nadelholz				Laubholz			
Schweden	118	2	57	31	0	26	0	26
Vereinigtes Königreich	74	0	37	0	0	0	0	3
Zypern	-	-	0	0				
Tschechien	2.204	157	2.042	127	15	5	9	9
Estland	543	13	103	2	46	0	10	0
Ungarn	7	0	7	0	6	0	5	0
Litauen	45	0	7	0	0	0	0	0
Lettland	287	0	32	0	35	0	11	0
Malta	-	-	-	-	0	0		
Polen	2.402	124	2.207	52	155	4	158	3
Slowenien	0	0	0	0	0	0	0	0
Slowakei	11	0	9	0	1	27	1	77
Rumänien	0	26	0	19	2	5	2	0
Bulgarien	0	1	-	-	1	0	0	0
Kroatien	-	-	-	-	1	0	1	0

*vorläufige Daten

Quelle: Statistisches Bundesamt, BMEL(515)

Folgende Indikatoren fließen für eine Abschätzung potenziell zukünftiger Lieferländer ein: das Selbstversorgungspotenzial größer 100 %, der Waldanteil, der Anteil zertifizierter Wälder sowie die zu erwartende Entwicklung des Waldbestandes. Eine Differenzierung in deren Anteil an Nadel- und Laubholz lässt sich aufgrund fehlender Statistiken nicht aufzeigen.

Tabelle 25 fasst diese Indikatoren für EU-Länder zusammen, die aktuell einen Selbstversorgungsgrad über 100 % aufweisen. Eine weitere wichtige Anforderung ist die ausschließliche Verwendung von legal geschlagenem Holz. Aktuelle länderspezifische Statistiken liegen nicht vor. Die EU-weiten Abkommen EUTR und FLEGT sollen den illegalen Holzschlag unterbinden und reduzieren diesen durch die Nachweispflicht des legalen Ursprungs zumindest in den EU-Mitgliedsstaaten.⁴⁹

Eine Abschätzung potenzieller Lieferländer wird unter der Annahme getroffen, dass sich Eigenverbrauch, Produktion und Selbstversorgungsgrad sowie Anteil zertifizierter Wälder in den einzelnen Ländern auch in Zukunft ähnlich entwickeln. Es lässt sich vermuten, dass die Anrainerststaaten Polen, Tschechien und Frankreich mit einem Selbstversorgungsgrad von 103 % bis 138 % und zertifizierten Waldanteilen von 50 % bis 75 % auch zukünftig Importpotenzial bieten könnten. Gestützt wird diese Aussage durch die zu erwartende Entwicklung der Waldentwicklung dieser Länder: Polen, das aktuell Hauptlieferant für Deutschland ist (Tabelle 24), hat sich zum Ziel gesetzt, seine Waldflächen bis 2050 von aktuell 31 % auf 33 % zu erhöhen.⁵⁰ Frankreich, relevant für den Import von Laubholz, fokussiert auf den Erhalt bestehender Waldflächen, untersagt eine Umnutzung von Wald, befürwortet Aufforstungen und erwartet eine jährliche Vergrößerung der Waldflächen um 0,3 %. Für Tschechien liegt keine langfristige Zielsetzung vor (Tabelle 25).

Die Länder Estland und Lettland haben einem Selbstversorgungsanteil von 152 % sowie 127 % und einen hohen zertifizierten Waldanteil von circa 30 % bis 65 %. Es ist zu beachten, dass für deren Export aktuell vor allem Finnland und Schweden die Hauptabsatzmärkte bilden. Im Gegensatz dazu nimmt Deutschland im Vergleich zu anderen EU-Staaten eine untergeordnete Rolle ein.⁵¹ Die Entwicklung der Holzquote von Finnland und Schweden und eine damit verbundene mögliche Steigerung der Importrate aus Estland und Lettland können nicht prognostiziert werden. Slowenien strebt an, seine Waldflächen zu erhalten und hat mit aktuell 218 % einen hohen Selbstversorgungsgrad unter den EU-Ländern. Eine Aussage über dessen Relevanz für Holzimporte nach Deutschland lässt sich jedoch aufgrund fehlender Informationen über die absolute Waldfläche und den Anteil der zertifizierten Waldfläche nur schwer treffen. Bezogen auf die eher geringe Landesfläche von circa 22.270 m² wird das Potenzial als eher gering eingeschätzt.

Eine konkrete Festlegung potenzieller Lieferländer bei steigender Holzquote lässt sich in dieser Studie nicht treffen. Unbekannt ist, wie sich der Eigenbedarf an Holz in Zukunft v. a. in den potenziellen Lieferländern Polen, Tschechien und Frankreich verändert. Nimmt dieser z. B. durch eine steigende Holzquote verschiedener Sektoren zu, wird dies einen direkten Einfluss auf den Selbstversorgungsgrad haben und vermutlich in einem verringerten Potenzial als Lieferland resultieren. Für eine präzisere Aussage bedarf es zudem detaillierteren Statistiken jeweils für Nadel- und Laubholz, die unter anderem einen Zusammenhang zwischen zertifizierten Waldanteilen und Importmengen von zertifizierten Hölzern aufzeigen aber auch die Erzeugung von für Baustoff relevanten Holzarten verdeutlichen würden.

⁴⁹ Vgl. Hirschberger (2008)

⁵⁰ Vgl. FRA (2015a) und FRA (2015b)

⁵¹ Vgl. Hirschberger (2008)

Tabelle 25: Ausgewählte Anforderungen an Holzimporte und zu erwartende Entwicklung für europäische Länder mit Selbstversorgungsgrad von Holz (Nadel- und Laubholz gesamt) von über 100 %.

Land	Anteil Waldflächen [1.000ha] ¹⁾	Anteil FSC-zertifiziert [%] ¹⁾	Anteil PEFC-zertifiziert [%] ¹⁾	Selbstversorgungsgrad [%] ²⁾	Zu erwartende Entwicklung ³⁾
Bulgarien	3.800 (35%)	38,6	0	110	Waldwachstum in nationalen Programmen aufgenommen
Dänemark	-	-	-	124	Kontinuierliche Zunahme ohne spezielles Regierungsprogramm
Estland	2.247 (53 %)	66,2	54,2	152	Anteil Staatswald mind. 20 % der Landesfläche ⁴⁾
Frankreich	16.974 (31 %)	56,2	47,7	113	Erhalt bestehender Waldflächen; Rodungen sind genehmigungspflichtig; Umnutzung von Wald wird durch Aufforstung kompensiert
Kroatien	-	-	-	107	k.A.
Lettland	3.358 (54 %)	31,1	50,7	127	Waldflächen sollen sich bis 2030 auf 55 % erhöhen und danach stabilisieren
Litauen	2.193 (35 %)	52,0	0	115	k.A.
Niederlande	-	-	-	138	Erhalt bestehender Waldflächen; keine Umnutzung von Waldflächen; befürworten von Aufforstungen, jährliche Erhöhung um 0,3 %
Polen	9.492 (31 %)	73,0	76,4	103	Waldflächen bis 2050 von 31 % auf 33 % erhöhen
Slowakei	1.923 (40 %)	7,6	63,9	115	k.A.
Slowenien	-	-	-	218	Waldflächen erhalten
Spanien	18.508 (37 %)	1,5	11,6	106	Keine Ziele im Regierungsprogramm bekannt
Tschechien	2.702 (35 %)	53,3	67,0	138	Keine langfristige Zielsetzung
Ukraine	10.082 (17 %)	41,1	0	100	k.A.
Ungarn	-	-	-	117	Waldflächen von 21 % auf 27 % erhöhen bis 2060

Quelle: ¹⁾FSC (2018), PEFC (2017), Statistisches Bundesamt (2017); ²⁾EUROSTAT (Stand März 2019), BMEL(515);

³⁾ Country Reports der einzelnen Länder Global Forest Resources Assessment 2015 (FRA 2015); ⁴⁾Forest Act (2006)

5 Konkurrenz bei intensiverer Nutzung von Holz als Baustoff und Kaskadennutzung (AP 1.5)

In diesem Kapitel wird untersucht, welche Konkurrenz für den Rohstoff Holz innerhalb der stofflichen Nutzung sowie in Bezug auf die energetische Nutzung besteht und wie sich diese Konkurrenz bei einer intensiveren Nutzung von Holz entwickelt. Darüber hinaus wird die Kaskadennutzung als möglicher Lösungsansatz für die Minderung der Konkurrenz betrachtet. In diesem Zusammenhang wird ein Überblick über die rechtlichen Rahmenbedingungen, Ökobilanzierung sowie Hemmnisse und Empfehlungen für die Umsetzung gegeben.

5.1 Konkurrenz bei intensiverer Nutzung von Holz als Baustoff

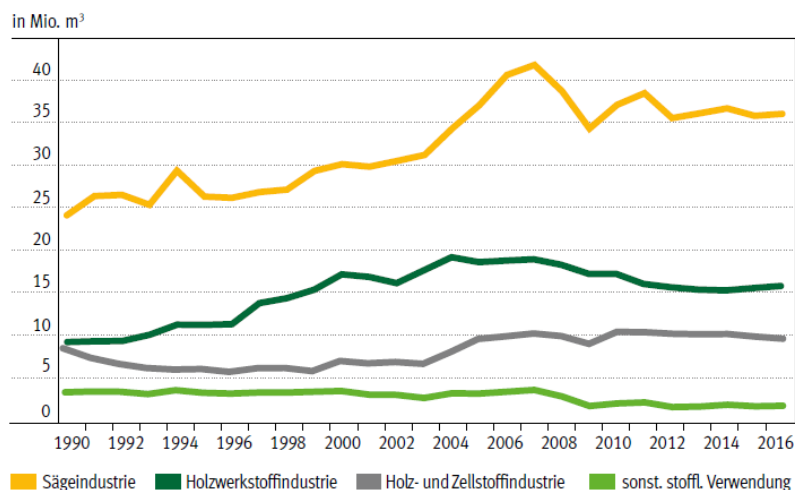
Die Wertschöpfungskette von Holz definiert die Nutzung des Rohstoffs (Waldholz, Sägenebenprodukte, Restholz aus Verarbeitung und Recyclingfaser) in verschiedenen Bearbeitungsstufen zu Halbwaren (Schnittholz, Holzwerkstoffplatten, Funier- und Sperrholz, Holz- und Zellstoff) bis hin zu Fertigwaren (Papier, Bau, Möbel, Verpackung, Sonstiges).⁵² Die Nutzung von Holz kann in stoffliche und energetische Verwertungen eingeteilt werden. In diesem Kapitel wird die Konkurrenz innerhalb der stofflichen Verwertung sowie zwischen energetischer und stofflicher Verwertung untersucht. Die nutzungsspezifische Eignung des Holzes wird hauptsächlich definiert durch die Holzart sowie die Qualitätsanforderungen. Prinzipiell werden an Holz als Baustoff höhere Qualitätsanforderungen gestellt als an Holz für andere stoffliche und energetische Verwendungen.

5.1.1 Stoffliche Nutzung

Bei den stofflichen Nutzern nimmt die Sägeindustrie mit circa 50 % den größten Anteil ein, gefolgt von circa 23% Holzwerkstoffindustrie und circa 15 % Holz- und Zellstoffindustrie (Abbildung 42). In dieser Studie wird fokussiert auf die Konkurrenz um Holz als Baustoff, Holz für Möbelbau, Holz für Papierherstellung und Holz für Instrumentenbau. Diese Verwendungen nutzen Holz auf unterschiedlichen Stufen der Wertschöpfungskette und bedienen sich direkt der Halbware oder in einem weiteren Prozessschritt der Fertigware.⁵³

⁵²⁻⁵⁷Vgl. FNR (2018)

Abbildung 42: Entwicklung der stofflichen Holzverwendung⁵⁷



Quelle: Mantau (2018), FNR (2018)

Holz als Baustoff zählt zur stofflichen Verwertung. Verwendet wird Schnittholz aber auch für Holzwerkstoffplatten wie z. B. Spanplatten. In Deutschland sind normativ nur bestimmte Holzarten zur Verwendung für tragende Zwecke zugelassen. Zu den Nadelhölzern gehören vor allem Kiefer, Lärche, Fichte, Tanne und Douglasie und zu den Laubhölzern Eiche, Buche und Rotbuche (Kapitel 2.4). In die nachfolgende Analyse werden in dieser Studie weitere Nadelhölzer (Western Hemlock, Southern Pine und Yellow Cedar) und Laubhölzer (Teak, Keruing, Afzelia, Merbau, Angélique (Basra-locus), Bongossi und Greenheart) einbezogen, die u. a. für die Herstellung von Brettschichtholz Verwendung finden können.⁵⁴

Möbelbau bezieht in dieser Studie auch den Innenausbau wie Einbaumöbel und Türblatt/Fensterrahmen mit ein. Neben Einbaumöbeln ist vor allem das lose Möbel der große Produktionssektor der Möbelindustrie. Der Holzeinsatz für Möbelbau bedient sich ebenso wie Holz als Baustoff hauptsächlich dem Schnittholz und den Holzwerkstoffen (z. B. Massivholzmöbel und Spanplatte). An Holz für Möbelbau und Baukonstruktion werden vergleichbare Anforderungen an Holzeigenschaften und Qualität gestellt. Für beide Sektoren sind z. B. hohe Steifigkeit, gute Verarbeitbarkeit, gute Beständigkeit (Dauerhaftigkeit) und Tragfähigkeit wichtige Kriterien. Die in Deutschland bekanntesten einheimischen Hölzer für Möbelbau sind Ahorn, Birke, Buche, Eiche, Erle, Esche, Fichte, Kirschbaum, Kiefer, Lärche, Pinie und Nussbaum. Die massiveren und robusteren Harthölzer der Buche und Eiche sind durch ihr ungewöhnliches Farbspiel und ihre Langlebigkeit häufig genutzte Hölzer für den Möbelbau. Buche und Eiche könnten wegen ihrer optimalen Eigenschaften in Zukunft vermehrt für den Bau von Gebäuden Anwendung finden (siehe Kapitel 2.4). Daher könnte eine zukünftige Konkurrenz zwischen Möbelbau und Holz als Baustoff hinsichtlich dieser beiden Hölzer entstehen. Die für den Möbelbau eingesetzten Weichhölzer Birke, Erle, Fichte, Kiefer und Pinie werden auch als Bauholz und Holzwerkstoffe eingesetzt. Bezüglich einer Konkurrenz zu den aktuell als Baustoff wichtigen Nadelhölzern ist die Verwendung von Fichten- und Kiefernholz für den Möbelbau ebenfalls relevant. Beide Hölzer weisen gute mechanische Eigenschaften auf und werden als Konstruktionsholz verwendet. Ihre hervorragende Bearbeitbarkeit, ihr helles Holz, die Farbvariationen von fast weiß bis gelblich sowie ihr geringes Gewicht machen Fichte aber auch zu einem geeigneten Holz für Möbelbau. Kiefernholz ist sehr gut geeignet für Schnitz- oder Drechselarbeiten und gilt außerdem als zuverlässiges Allrounder-Material für den Möbelbau.

⁵⁴ Vgl. Lißner, Rug und Steinmetz (2017)

Ein weiterer Konkurrent bei intensiverer Nutzung von Holz als Baustoff ist die Papierindustrie inklusive Druckmedien. Aktuell wird Papier zu 95 % aus Holz in Form von Holzstoff, Halbzellstoff oder Zellstoff hergestellt. Nadelhölzer wie Fichte, Tanne, Kiefer und Lärche werden sehr häufig zur Papierherstellung verwendet. Gegenüber den Laubhölzern können die längeren Fasern der Nadelhölzer leichter verfilzen und damit die benötigte höhere Festigkeit des Papiers erzeugen. Auch Laubhölzer wie Buche, Pappel, Birke und Eukalyptus werden gemischt mit Nadelholz-Zellstoff für die Papierproduktion eingesetzt. Für die Papierherstellung kann der Sekundärrohstoff Altpapier eingesetzt und fünf- bis sechsmal recycelt werden. 2016 erreichte der Anteil der Altpapiere etwa 75 %.⁵⁵ Aus Qualitätssicht benötigt die Papierherstellung nicht das hochqualitative Vollholz und bedient sich den vor allem den Halbwaren Holzstoff und Zellstoff.

Das Holz für den Instrumentenbau wird auch als Klangholz bezeichnet. Häufig eingesetzte Holzarten sind Ebenholz und Mahagoni, die für den Baubereich eine untergeordnete Rolle spielen. Unter Konkurrenz zum Baustoff steht das Fichteholz, das auch als Klangholz, Tonholz oder Resonanzholz bezeichnet wird. Fichteholz gilt als unersetzbares Material für qualitativ hochwertigen Instrumentenbau, das nicht durch anderes Holz oder synthetisches Material ersetzt werden kann.⁵⁶ Die Konkurrenz zu Holz als Baustoff ist aber vernachlässigbar.

5.1.2 Energetische Nutzung

Das Heizen mit Holz gilt in der Regel als umweltverträglicher als das Heizen mit fossilen Brennstoffen, da Holz ein nachwachsender Rohstoff ist. Verwendung findet dabei u. a. das Scheitholz, aber auch Sägenebenprodukte, z. B. in Form von Pellets. Nicht jede Holzart ist als Brennstoff geeignet. Für die energetische Nutzung sind Qualitätsanforderungen wie Brennwert, Entzündlichkeit und die jeweiligen Brenneigenschaften entscheidend. In Deutschland eignen sich vor allem heimische Harthölzer wie Buche, Ahorn oder Robinie als Brennholz. Kirsche und Esche haben auch besonders hohe Brennwerte, wodurch sie eine gleichmäßige Wärme abgeben und damit ein angenehmes Raumklima erzeugen können. Das Holz der Eiche ist nur teilweise zum Heizen geeignet, da sich die Gerbsäuren beim Kondensieren des Wasserdampfs in den Abgasen an den Wänden des Schornsteins ablagern und zum sogenannten „Versotten“ führen. Die oft als Baustoff benutzten Nadelhölzer Kiefer, Tanne und Fichte sind bedingt als Brennstoff geeignet. Sie sind zwar günstiger, versprühen jedoch beim Brennprozess Funken und sollten deshalb nur in geschlossenen Anlagen verbrannt werden. Diese Nadelhölzer sind auch leicht entflammbar und werden häufiger als Holz zur Anzündung und weniger als Hauptbrennstoff benutzt. Tabelle 27 fasst die geeignete Nutzung verschiedener Hölzer zusammen.

Seit 1990 hat die stoffliche und energetische Verwendung von Holz kontinuierlich zugenommen. Dabei hat sich die energetische Verwendung der stofflichen Verwendung angenähert und entspricht seit ca. 2009 mit 60 Mio. m³ einem vergleichbaren Anteil wie für die stoffliche Nutzung (Abbildung 43).^{57,58} Die erhöhte Nachfrage nach Energieholz kann in einigen Sektoren zu einer gesteigerten Rohstoffkonkurrenz führen. Mögliche Konkurrenzen zur stofflichen Nutzung können bei Industrieholz (z. B. Scheitholz- statt Papierproduktion), Sägenebenprodukten (z. B. Pelletierung statt Verwendung für Spanplatten) und Altholz (z. B. Verheizung in Biomasseheiz(kraft)werken statt Verwendung für Spanplatten) gefunden werden.

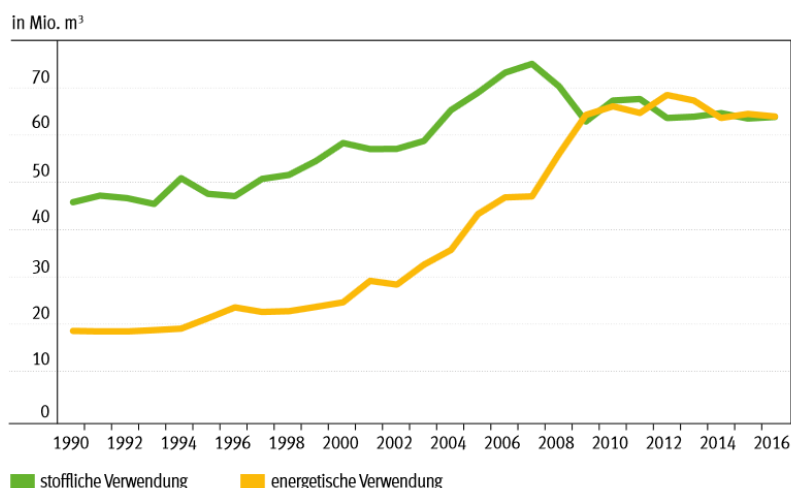
⁵⁵ Vgl. FNR (2018)

⁵⁶ Vgl. Domont, P. (2001)

⁵⁷ Vgl. Fischer et al. (2016)

⁵⁸ Vgl. FNR (2018)

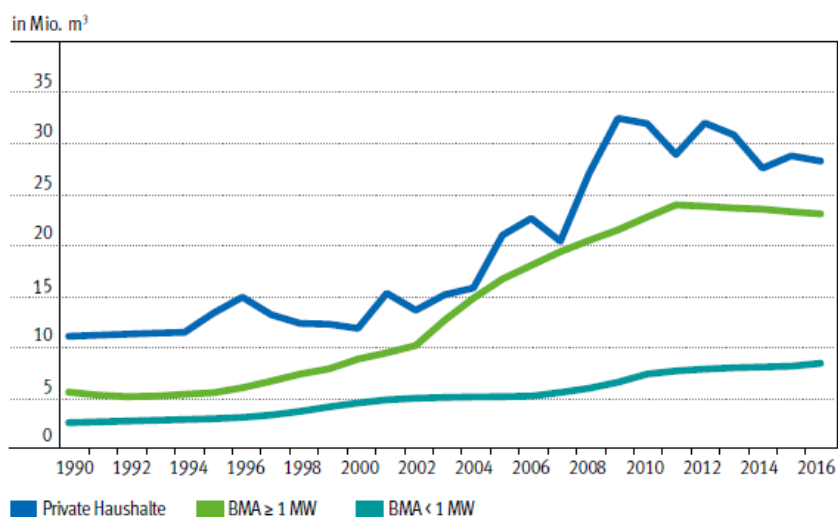
Abbildung 43: Entwicklung der der stofflichen und energetischen Nutzung von Holz⁵⁹



Quelle: Mantau (2018), FNR (2018)

Das rasche Wachstum der Brennholzindustrie und der Anstieg des inländischen Holzverbrauchs führen zu einer Konkurrenz zwischen der stofflichen und energetischen Nutzung. Dies betrifft sowohl das Frischholz und Waldderbholz, z. B. Konkurrenz Scheitholz vs. Schnittholz, als auch bei Sägenebenprodukten, Industrierestholz und Altholz, z. B. Konkurrenz Pellets vs. Holzwerkstoffe. Circa 50 % der energetischen Holzverwendung fällt den privaten Haushalten, circa 35 % den Großfeuerungsanlagen und 15 % den Kleinfeuerungsanlagen zu (Abbildung 44). Entscheidend sind die eingesetzten Holzsortimente. Tabelle 26 verdeutlicht, dass vor allem die privaten Haushalte 60 % Scheitholz aus Waldderbholz verwenden. Davon sind circa 63 % Laubholz und 37 % Nadelholz. Es lässt sich eine Konkurrenz für Schichtholz im Baubereich ableiten. Für Klein- und Großfeuerungsanlagen beträgt der Anteil von Schnittholzresten aus Sägewerken bzw. Altholz circa 19 % bis 50 %. Dies lässt eine Konkurrenz zu stofflichen Holzwerkstoffen wie Spanplatten vermuten.⁵⁹

Abbildung 44: Entwicklung der energetischen Holzverwendung



Quelle: Mantau (2018), FNR (2018)

⁵⁹ Vgl. FNR (2018)

Tabelle 26: Anteile der eingesetzten Holzsortimente in Privaten Haushalten, Kleinfeuerungsanlagen und Großfeuerungsanlagen⁶⁰

Holzsortiment	Private Haushalte [%]	Kleinfeuerungsanlagen [%]	Großfeuerungsanlagen [%]
Scheitholz (Derbholz)/Wald	56.8	13.7	2.3
Scheitholz (Restholz)/Wald	11.5	31.4	12.3
Scheitholz/Garten	7.6		
Landschaftspflegeholz	1.4	15.9	13.2
Rinde Derbholz	1.4		8.5
Schnittholzreste Sägewerk	2.9	18.4	5.9
Schnittholzreste Altholz			48.6
Pellets und Holzbriketts	10.1	7.3	
Hackschnitzel	1.8		
Sonstiges Industrieholz		6.8	
Sonstiges		6.6	4.4

Abbildung 45 verdeutlicht die intensiviertere Konkurrenz in der Altholznutzung. Die Entwicklung für den Zeitraum 2001 bis 2013 zeigt eine Zunahme von Altholz für energetische Nutzung. Nur ein Viertel des Altholzes wurde in die stoffliche Nutzung zurückgeführt, während bis zu drei Viertel der energetischen Nutzung zugeführt wurden. Für Frischholz existiert ebenfalls eine verschärfte Nutzungskonkurrenz von energetischer und stofflicher Nutzung. Fast die Hälfte des geernteten Frischholzes fließt direkt oder bei der industriellen Verarbeitung in die energetische Nutzung.^{61,62} Diese Entwicklung der Brennholzindustrie und die daraus entstehende Konkurrenz zur stofflichen Nutzung seit dem Jahr 2000 ist unter anderem auf das Erneuerbare Energiegesetz (EEG), das Energie-Wärmegesetz sowie Marktanzreizprogramme im Wärmebereich zurückzuführen und stellen eine Marktreaktion auf steigende Preise fossiler Energieträger dar. Kritisch ist diese Entwicklung ebenfalls in Bezug auf einen ressourcenschonenden Umgang mit Holz. Prinzipiell besitzt die stoffliche Nutzung von Holz gegenüber der rein energetischen Nutzung Vorteile in der Wertschöpfung. Auch aus Umweltsicht ist eine hochwertige und langlebige stoffliche Nutzung der direkten energetischen Nutzung vorzuziehen. Eine Minderung dieser Konkurrenz kann unter anderem durch eine erhöhte Rückführung von Altholz in die stoffliche Nutzung realisiert werden.⁶³ Kapitel 5.2 gibt einen vertieften Überblick, wie die Konkurrenz zwischen energetischer und stofflicher Nutzung mittels Kaskadennutzung gemindert werden kann.

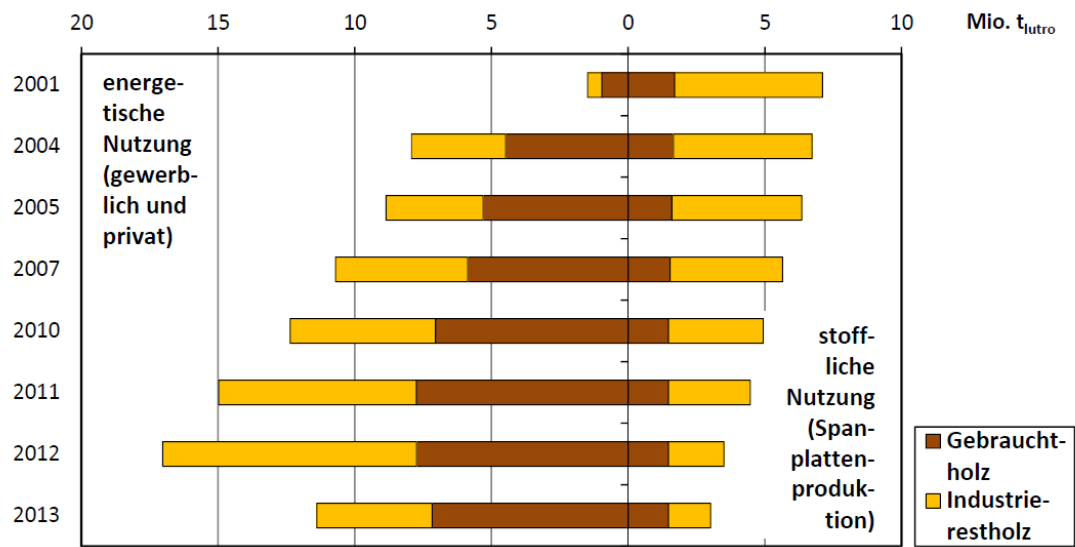
⁶⁰ Vgl. FNR (2018)

⁶¹ Vgl. Knauf (2017)

⁶² <https://www.tum.de/studineWS/ausgabe-032015/show-032015/article/34365/> (Zugriffsdatum 16.10.2019)

⁶³ Vgl. Ludwig, Gawel und Pannicke (2016)

Abbildung 45: Stoffliche und energetische Verwendung von Altholz in Deutschland 2001 bis 2013



Quelle: Ludwig, Gawel und Pannicke (2016)

Tabelle 27 fasst verschiedene Hölzer und deren Eignung für eine stoffliche und energetische Nutzung zusammen. Es wird deutlich, dass keine Holzart explizit allein nur einer energetischen Nutzung zugewiesen werden kann. Die Hölzer der Fichte, Kiefer, Tanne sowie von Buche, Ahorn und Kirsche werden für vielfältige stoffliche und energetische Nutzung verwendet.

Tabelle 27: Überblick über verschiedene Holzarten und deren Verwendungsmöglichkeit für stoffliche und energetische Nutzung

Holzart	Stoffliche Nutzung				Energetische Nutzung
	Baukonstruktion	Innenausbau	Möbelbau	Andere Verwendung	
Nadelholz					
Fichte	X	X	X	Holzwerkstoff, Papier- und Zellstoffindustrie	X
Kiefer	X	X	X	Papierherstellung	X
Tanne	X	X	X	Papierherstellung	X
Lärche	X	X	X	Erd-, Brücken und Wasserbau, Papierherstellung	
Douglasie	X	X			
Western Hemlock	X				
Southern Pine	X				
Yellow Cedar	X				
Laubholz					
Buche	X	X	X	Spielzeugproduktion, Papierherstellung	X
Eiche	X	X	X	Werkzeugbau, Verpackungs- und Transportkiste, Behältnisse	
Ahorn	X	X	X		X
Birke	X			Papierherstellung	X
Robinie	o	o	o		X
Edelkastanie	X	X	X	Spielgerät	
Erle	X				
Esche		X		Werkzeug, Sportgerät	X
Teak	X	X	X		
Keruing	X				
Afzelia	X				
Merbau	X				
Angélique	X				
Bongossi	X				
Greenheart	X				
Kirsch	X	X	X		X
Nussbaum	X				
Birke	o	X	X		
Walnussbaum			X	Instrumentenbau	
Eukalyptus			X	Papierherstellung	

X Verwendung möglich, o Keine Verwendung möglich

5.1.3 Mögliche künftige Entwicklungen und Handlungsbedarf

Für mögliche künftige Entwicklungen werden die Ergebnisse einer Fallstudie für die Region Bayern⁶⁴ untersucht, die die Auswirkung auf stoffliche und energetische Konkurrenz unter Verwendung verschiedener Szenarien aufzeigt. Ein Szenario beinhaltet die Erhöhung des Energieholzpreises. Eine Preiserhöhung resultiert generell nicht in einer Erhöhung des Holzangebotes, sondern eher in einer Verknappung des Holzangebotes. Für die Holzwerkstoffindustrie würde sich mit einer Verschiebung von circa 8 % von der stofflichen zur energetischen Nutzung keine gravierende Konkurrenz zwischen Energieholz und Produktionskapazitäten für Spanplatten ergeben. Diese Konkurrenz würde sich mit steigenden Preisen zugunsten einer erhöhten energetischen Holznutzung intensivieren. Handlungsbedarf für die stoffliche Verwertung, v. a. im Bauwesen, besteht in einer Erhöhung des Einsatzes von Laubholz. Die Holzaufkommens-Szenarien weisen darauf hin, dass zukünftig mit deutlich höheren Laubstammholz mengen zu rechnen ist. Für eine stoffliche Verwendung dieses Sortiments müssen jedoch kostengünstige Produkte mit neuen Verwendungsbereichen z. B. im Bauwesen geschaffen werden, die eine Alternative zu Produkten aus Nadelholz darstellen. Wie sich eine höhere Verwendung von Laubholz als Baustoff auf die Konkurrenz zum Möbelbau auswirkt, lässt sich nur schwer abschätzen.

Wird die Nutzung von Holz als Baustoff intensiviert, so wird auch in Zukunft die Eignung des Holzes hauptsächlich durch die nutzbare Holzart sowie die Qualitätsanforderungen definiert sein. Prinzipiell werden auch bei einer Nutzungsintensivierung höhere Qualitätsanforderungen an Holz als Baustoff gestellt werden als für eine energetische Verwendung. Die Verwendung von Frischholz wird demnach vermutlich weiter in die stoffliche Verwertung fließen. Die Auswirkung einer intensiveren Nutzung auf die Konkurrenz innerhalb der stofflichen Verwendung lässt sich unter den zur Verfügung stehenden Daten schwer abschätzen. Die Analyse wird erschwert, da zusammenhängende Studien und detaillierte Statistiken über Rohstoffe, Halbwaren (Schnittholz, Holzwerkstoffplatten, Furnier und Sperrholz sowie Holzstoff und Zellstoff) und produzierte Fertigwaren (Möbel, Bau, Papier, Verpackung) nicht zur Verfügung stehen. Ebenso fehlen Statistiken und Informationen über einen intersektoralen Güteraustausch der Holzwaren. Die Anteile zur aktuellen Verwendung innerhalb der stofflichen Nutzung lassen sich damit nicht quantifizieren, und ein direkter Zusammenhang zwischen den Stufen der Wertschöpfungskette und der letztendlichen Verwendung lässt sich nicht abschließend ableiten. Die Konkurrenz wird ebenfalls beeinflusst durch die Verwendung von zertifizierten Hölzern, die im Sinne einer nachhaltigen Holzwirtschaft generell erwünscht ist. Statistiken über deren nutzungs- und holzartenspezifischen Einsatz und Absatz auf dem Markt stehen derzeit für die Halb- und Fertigwaren nicht zur Verfügung. Vermutungen über eine Konkurrenz bei intensiverer Nutzung von Holz als Baustoff lassen sich wie folgt äußern: Bei steigender Holzbauquote lässt sich eine steigende Konkurrenz zwischen Holz als Baustoff und Möbelbau vermuten. Begründet wird dies zum einen durch gleichwertige Relevanz von Holzeigenschaften, wie z. B. mechanische Eigenschaften und Bearbeitbarkeit. Zum anderen werden für eine gesteigerte Holzbauquote der Einsatz von Laubholz und die Verwendung von Baubuche und Eiche interessant, die bisher vorwiegend für den Möbelbau eingesetzt wurden. Zwischen Papierindustrie und Bau lässt sich vermuten, dass basierend auf den notwendigen Qualitätsanforderungen sowie der Quote der Altpapiernutzung die Konkurrenz eine geringe Rolle einnimmt.

Die Konkurrenz zwischen Holz als Baustoff und Brennstoff ist hoch und wird vermutlich auch in Zukunft ähnlich groß sein. Die Konkurrenz betrifft den Rohstoff direkt sowie Holzwaren, d. h. die Verwertung von hochwertigem Vollholz, welches geeignet wäre für Baukonstruktion, sowie die stoffliche Verwertung zu Holzwerkstoffen, wie Spanplatten. Entscheidender Hebel für die Min-

⁶⁴ Vgl. TUM (2015)

derung der Konkurrenz zwischen energetischer und dieser stofflichen Nutzung ist die generelle Senkung des Ressourcenverbrauchs. Handlungsbedarf besteht vor allem im Energiesektor bei der Senkung des Energiebedarfs. Hier sind vor allem Maßnahmen auf der Gebäudeebene, z. B. wirksamere Wärmedämmung und damit weniger Wärmeverlust, anzustreben.⁶³

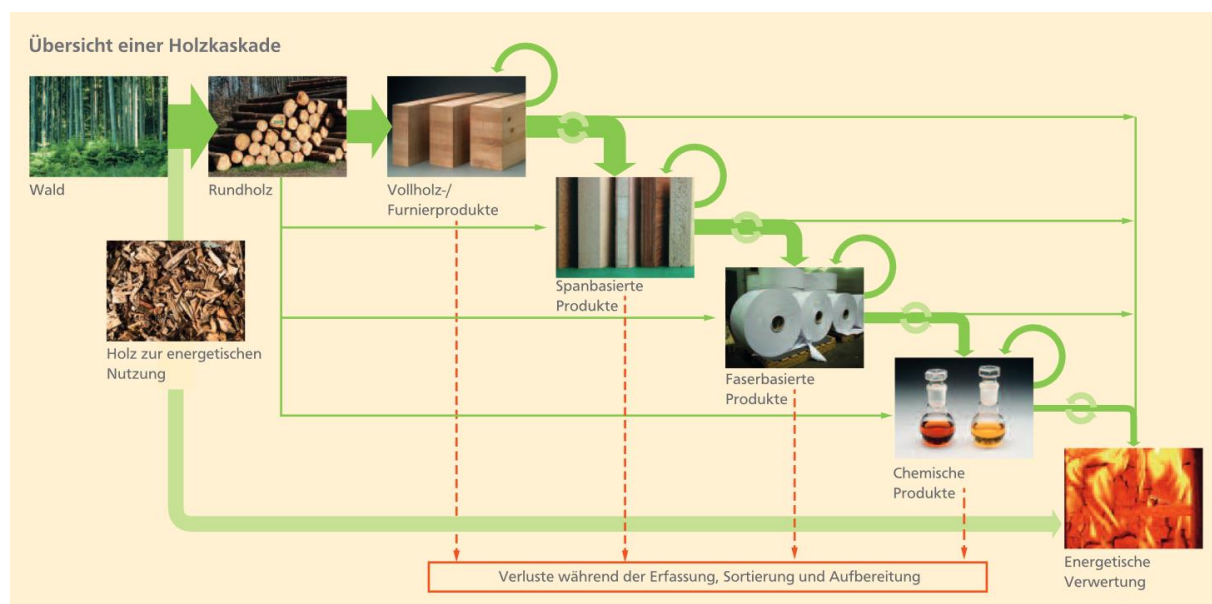
Eine Konkurrenz innerhalb der stofflichen sowie zwischen stofflicher und energetischer Verwendung könnte z. B. eine verstärkte Kaskadennutzung mindern. Deren Potenzial ist aus Gründen der gesetzlichen Rahmenbedingungen, Umweltwirkung und fehlender Nutzungskonzepte noch nicht ausgeschöpft. Auf Hemmnisse sowie Empfehlungen für eine praxistaugliche Umsetzung wird im nachfolgenden Kapitel 5.2 näher eingegangen.

5.2 Kaskadennutzung

In diesem Kapitel werden die Kaskadennutzung für Holz, bestehende rechtliche Rahmenbedingungen, assoziierte Umweltwirkungen sowie Hindernisse und Empfehlungen für den praxistauglichen Einsatz von Kaskadennutzung beschrieben. Aufgrund der steigenden Nachfrage nach Holz (Abbildung 43) und der Konkurrenz zwischen stofflicher und energetischer Nutzung von Holz (Kapitel 5.1) wird die Kaskadennutzung in Deutschland seit einigen Jahren als ein möglicher Lösungsansatz für eine effizientere Nutzung der knappen Ressource Holz angesehen.

Bei der Kaskadennutzung wird das Holz über mehrere Stufen wiederholt genutzt. Ziel ist es, den Rohstoff und die daraus hergestellten Produkte so lange wie möglich im Wirtschaftssystem zu nutzen und so einen Beitrag zum ressourceneffizienten Wirtschaften und zu einer geringeren Umweltwirkung zu leisten.⁶⁵ Am Ende der mehrstufigen stofflichen Nutzung erfolgt die energetische Verwertung (Abbildung 46).

Abbildung 46: Übersicht einer exemplarischen Kaskadennutzung von Holz mit ihren einzelnen Stufen



Quelle: Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G., Richter, K. (2016)

Altholz bildet die Grundlage für die Kaskadennutzung im Holzsektor. Durch rechtliche Rahmenbedingungen werden Holzstoffströme und die Verwendung von Frisch- und Altholz für die energetische oder stoffliche Nutzung gesteuert. Auf europäischer Ebene ist für Altholz vor allem die

⁶⁵ Vgl. Ludwig, Gawel und Pannicke (2016)

Abfallrahmen-Richtlinie (AbfRL) maßgeblich, die auf nationaler Ebene durch das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG 2012) umgesetzt wird. Sie priorisieren den Umgang mit Abfall unter der übergeordneten Zielstellung Schutz von Umwelt und Mensch. Dabei sollen Nutzungskonzepte und Anforderungen in Hinblick auf zu erwartende Emissionen, Ressourcenschonung, Energieeinsatz und -gewinnung sowie Anreicherung von Schadstoffen abgewogen werden. Ein Restprodukt aus Holz kann nach Analyse dieser Anforderungen energetisch oder stofflich verwendet werden. Wesentlich ist, dass nach §4 KrWG Nebenprodukte keine Abfälle sind und damit ausdrücklich nicht unter die Abfallhierarchie und deren Anforderungen fallen. Nach Auffassung der EU-Kommission zählen im Holzbereich zu den Nebenprodukten Schnittholz, Sägemehl, Holzspäne und Schnittabfälle, die als Rohmaterialien für die Herstellung von z. B. Spanplatten gelten. Die Einordnung eines Restproduktes als Nebenprodukt ist demnach essenziell für eine weitere stoffliche Verwendung. Die Altholzverordnung (AltholzV) definiert die Anforderungen an die stoffliche und energetische Verwendung von Altholz sowie an dessen Beseitigung. Altholz wird in Abhängigkeit der Schadstoffbelastung in die Klassen AI bis AIV eingeteilt. Für die stoffliche Nutzung kann Altholz der Klasse AI weitgehend ohne Einschränkung, und Altholz der Klasse AII unter Einhalten der Schadstoffgrenzwerte verwendet werden.^{66,67}

Quellen für Altholz sind Möbel, Balken und andere Materialien aus Frischholz, von denen ein Teil nach Lebensende als Altholz in die Abfallbehandlung gelangt. Das Altholz wird sortiert, falls nötig aufbereitet und kann so der Kaskade zugeführt werden.⁶⁸ Die Herstellung des Holzwerkstoffs Spanplatten hat in der Kaskadennutzung aktuell die höchste Marktrelevanz für die stoffliche Altholzverwendung. Andere stoffliche Verwendungen, wie MDF, OSB, Zellstoffe oder der Einsatz im Landschafts- oder Gartenbau, nehmen eine untergeordnete Rolle auf dem Wirtschaftsmarkt ein.⁶⁹

Das Vorhandensein von Altholz in ausreichender Qualität und Menge ist die Voraussetzung der Kaskadennutzung von Holz. Unterschiedliche Nutzungsstufen bedingen dabei unterschiedliche Qualitätsansprüche. Hinsichtlich der Verwendung von Altholz als Baustoff ist vor allem die hochwertige Verwendung in den oberen Kaskadenstufen, z. B. für tragende Baukonstruktion oder für den Innenausbau, interessant. Diese Verwendung benötigt qualitativ hochwertiges, möglichst großformatiges und nicht verunreinigtes Altholz. Hohes Potenzial für die Gewinnung von diesem qualitativ hochwertigen Altholz wird der Rückgewinnung von Baumaterial aus Gebäudeabbrüchen zugewiesen. Eine wissenschaftliche Studie zur Kaskadennutzung von Altholz in Bayern verdeutlicht das theoretische Potenzial der Wiederverwendung, welches aus dem Gebäuderückbau der stofflichen Verwertung zugeführt werden könnte. Fast die Hälfte des gewonnenen Altholzes könnte der Altholzklasse AI und AII (AltholzV) und damit der stofflichen Verwertung zugeführt werden. Bei 25 % des Holzes handelt es sich um großformatiges Vollholz, dessen Wiederverwertung in hochwertigen Kaskaden, z. B. als Bauteil, theoretisch möglich ist. Weitere 19 % könnten für Holzwerkstoffe wie Spanplatten verwendet werden (Abbildung 47). Damit dieses Potenzial in der Praxis Anwendung findet, müssen ein rationeller Einsatz von Holzschutzmitteln und vor allem eine sorgfältige Trennung, Sammlung und Aufbereitung des anfallenden Altholzes vorausgesetzt werden.⁷⁰

Bisher werden bei der industriellen Sammlung im Bau- und Abbruchbereich häufig unterschiedliche Güteklassen (§2 AltholzV) gemeinschaftlich entsorgt. Dies führt dazu, dass hochwertiges

⁶⁶ Vgl. Knauf, M. (2017)

⁶⁷ Vgl. Ludwig, G., Gawel, E., Pannicke, N. (2016)

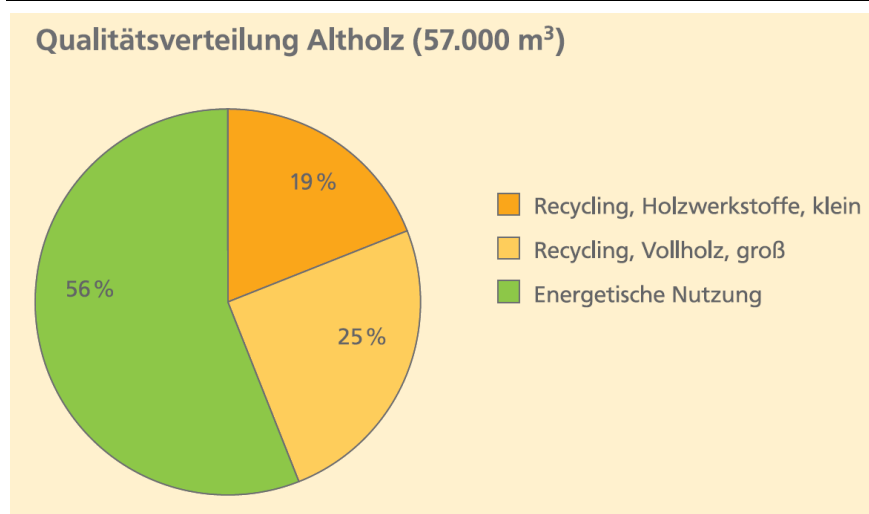
⁶⁸ Vgl. Fehrenbach, H. et al. (2017)

⁶⁹ Vgl. Knauf, M. (2017)

⁷⁰ Vgl. Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G., Richter, K. (2016)

naturbelassenes oder lediglich mechanisch bearbeitetes Holz mit behandeltem, verunreinigtem oder mit Schadstoffen belastetem Holz vermischt wird. Das Problem setzt bei der gewerblichen und privaten Sammlung sogar noch früher ein, denn hier wird das Altholz bisher nur zu Teilen geborgen. Derzeit findet in Deutschland eine Sortierung häufig erst am Recyclinghof statt und dann meist nur visuell. Bei einer visuellen Prüfung können die Schadstoffgehalte (wie z. B. Arsen, Blei, Cadmium) aber in den meisten Fällen nicht erkannt werden. Um einer Fehleinschätzung zu entgehen, werden viele Hölzer in qualitativ schlechtere Altholzkategorien eingestuft, sodass sie dann unter Umständen nicht mehr stofflich genutzt werden können und der energetischen Verwertung zugeordnet werden. Der stofflichen Nutzung von Altholz werden durch diese Handhabung potenzielle Rohstoffe entzogen. Das geltende Recht beinhaltet aktuell für die Getrenntsammlung eine sehr allgemeine Verpflichtung (§7 Abs.1 KrWG). Der mengenmäßig größte Anteil an Altholz wird dem Siedlungsabfall sowie Bau- und Abbruchsabfällen zugeschrieben. Diese unterstehen der Gewerbeabfallverordnung (GewAbf-V). Die Novellierung der GewAbf-V beinhaltet mit §3 und §8 Anforderungen und Regeln an den Abfallerzeuger zu einer verpflichtenden Erfassung und Sortierung von u. a. Altholz. Gewährleistet werden könnte die Getrenntsammlung beispielsweise durch eine Kontrollpflicht. Die dadurch erwirkte Verbesserung der Erfassung von Altholz sollte in der Praxis auf dessen Umsetzung und Wirkung evaluiert werden. Als kritisch für die Getrenntsammlungspflicht wird die Ausnahmeregelung der wirtschaftlichen Unzumutbarkeit erachtet. Durch diese kann zum Beispiel die energetische Verwertung eine kostengünstigere Alternative gegenüber der stofflichen Verwertung sein. Die Einführung einer Recyclingquote in der GewAbf-V könnte diesem Effekt entgegenwirken.⁷¹

Abbildung 47: Qualitätsverteilung von Altholz aus Gebäudeabbrüchen im Jahr 2011 für den Freistaat Bayern



Quelle: Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G., Richter, K. (2016)

Im Sinne des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms ProgRess soll die Nutzung von Biomasse für stoffliche und energetische Zwecke effizient und nachhaltig ausgebaut werden.⁷² Demzufolge ist neben der reinen Betrachtung der Konkurrenz auch der Einfluss einer der stofflichen/energetischen Verwertung auf die Ressourceneffizienz zu beurteilen. Unter den derzeitigen Rahmenbedingungen kann man zusammenfassen, dass die stoffliche Nutzung von Holz mit anschließender energetischer Verwertung im Vergleich zur direkten energetischen Verwertung eine bessere oder ähnliche Umweltbilanz hat. Vor allem Frischholz sollte der stofflichen Nutzung

⁷¹ Vgl. Ludwig, G., Gawel, E., Pannicke, N (2016)

⁷² Vgl. Die Bundesregierung (2012)

zugeführt werden. Die stoffliche Verwertung von Stammholz, z. B. durch Massivholzprodukte, zeigt deutliche Umweltvorteile und bietet hohes Substitutionspotenzial anderer Materialien. Daher sollte dessen direkte energetische Nutzung vermieden werden.⁷³ Dem gegenüber stehen aufwendigere Holzprodukte wie Holzwerkstoffe, die aus minderwertigerem Holz hergestellt werden können. In Bezug auf Holzwerkstoffe zeigen wissenschaftliche Studien, dass vor allem der Anfang der Produktionskette hohes Potenzial hat und damit entscheidend für eine hohe Ressourceneffizienz ist. Wurde am Anfang der Produktionskette Altholz statt Frischholz verwendet, konnten Spanplatten mit einer Effizienzquote von 46 % statt 21 % hergestellt werden. Auch für die weitere Verarbeitung bleibt die Kaskadennutzung effizienter, jedoch in einem deutlich geringeren Umfang.⁷⁴ Andere Studien weisen darauf hin, dass die geringere Umweltwirkung einer stofflichen Mehrfachnutzung gegenüber der energetischen Nutzung nur dann gegeben ist, wenn die Prozesseffizienz bei der Verarbeitung gesteigert wird. Vor allem der Energiebedarf und aktuelle Verbrennungstechnologien bei der Herstellung von Spanplatten verursachen eine hohe Umweltwirkung, die eine mehrstufige stoffliche Kaskadennutzung bei Betrachtung der Ökobilanz nicht immer rechtfertigt. Eine Verbesserung der Verbrennungstechnologie ist unbedingt anzustreben. Weiteres Einsparpotenzial der Umweltwirkung wird erreicht durch eine möglichst effiziente Holzaufbereitung und Logistik sowie durch geringe Materialverluste und einen durchdachten Einsatz von Hilfsstoffen wie Leim.^{75,76} Eine erfolgreiche Kaskade benötigt möglichst „reine“ Ausgangsstoffe. Daher sollte bereits bei der Produktion der Waren darauf geachtet werden, dass diese für eine Wiederverwertung geeignet sind. Eine Zugabe von fossilbasierten Bindemitteln, Zusatzstoffen oder Klebern sollte danach möglichst reduziert werden.

Anhand der untersuchten Studien lässt sich zusammenfassen, dass die Kaskadennutzung ein wertvoller Ansatz für ressourceneffizientes Wirtschaften ist und ein angemessenes Konzept bildet, um der steigenden Nachfrage nach Holz nachzukommen und die Konkurrenz zwischen stofflicher und energetischer Nutzung zu reduzieren. Das Potenzial wird jedoch noch zu wenig ausgeschöpft. Die Ursachen liegen unter anderem in den gesetzlichen Rahmenbedingungen, in Umsetzungskonzepten und in der unzureichenden Sammlung von Altholz im Sinne der Menge und Qualität. Die nachfolgenden Vorschläge sollen Ansätze für die praxistaugliche Umsetzung und Optimierung der Kaskadennutzung liefern. Dabei ist zu beachten, dass die Prozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette gesamthaft die Umweltwirkung beeinflussen und damit eine wesentliche Grundlage für das Abwägen der stofflichen oder energetischen Verwertung im Sinne einer ressourceneffizienten Wirtschaft bilden.

Eine Ursache der geringen Altholznutzung für die stoffliche Verwertung liegt beispielsweise in der einseitigen Förderung der energetischen Verwertung durch das Erneuerbare Energien-Gesetz (EEG), vorhandenen Marktanreizen im Wärmebereich und steigenden Preisen fossiler Energieträger (siehe Kapitel 5.1.2). Eine wichtige Maßnahme für die Lockerung dieser Konkurrenz sowie eine bessere Getrenntsammlung von zur rein stofflichen Nutzung nutzbaren Altholzes wäre zum Beispiel in der aktuellen Novelle der Altholzverordnung die vom BDE geforderte Umsetzung⁷⁷, dass die energetische und stoffliche Nutzung gleich hochwertig sind, die Getrenntsammlungspflicht deutlich zu verankern und hochwertige Altholzklassen (aktuell Altholz der Kategorie AI) für die energetische Nutzung unterbunden wird. Eine weitere Möglichkeit ist die Verwertung von Altholz bis Altholzklasse AIV, wenn deren Schadstoffanreicherung zukünftig

⁷³ Gärtner, S., Hienz, G., Keller, H., Müller-Lindenlauf, M. (2014)

⁷⁴ Vgl. Risse, M., Weber-Blaschke, G., und Richter, K. (2017)

⁷⁵ Vgl. Höglmeier, K., Weber-Blanke, G., Richter, K. (2016)

⁷⁶ Gärtner, S., Hienz, G., Keller, H., Müller-Lindenlauf, M. (2014)

⁷⁷ Vgl. BDE (2018) Quelle: BDE Bundesverband der Deutschen Entsorgungs-, Wasser- und Rohstoffwirtschaft e.V. (2018): Novellierungsbedarf der AltholzV. Anmerkungen des BDE

durch neue Technologie minimiert wird. Vorschläge dieser hochwertigen Verwertung von Altholz der Kategorien AII bis AIV werden jedoch teilweise kritisch betrachtet, da v. a. bei den Klassen AIII und AIV ein Restrisiko besteht, dass schadstoffbelastetes Material im Produktkreislauf verbleibt.^{78,79}

Für die Umsetzung und Praxistauglichkeit ist die Erarbeitung von Nutzungs- und Verarbeitungskonzepten notwendig. Materialtechnisch gesehen ist der Rohstoff Holz grundsätzlich für Kaskadennutzung geeignet. Jedoch müssen Nutzungskonzepte über die gesamte Wertschöpfungskette optimiert und entworfen bzw. Rückkopplung innerhalb der Kette mit erfasst werden. Konzepte mit einer klar strukturierten Kaskadennutzungsordnung können die effiziente Ressourcennutzung durch eine Kaskade erfolgreich unterstützen und realisieren. Es müssen Akteure entlang der gesamten Wertschöpfungskette stärker mit einbezogen, sensibilisiert und vernetzt werden. Bereits am Anfang der Kette sollte über die Verwertungsmöglichkeiten der verschiedenstufigen Produkte entschieden werden. Es wird empfohlen, bereits in der Design- und Bauphase die Rückgewinnungsmöglichkeit des Holzes, z. B. durch den bewussten Einsatz von Hilfsstoffen, mit einzubeziehen. Die Ressourceneffizienz betreffend steht der gesamte Prozess einer Kaskadennutzung im Fokus. Damit eine stoffliche Mehrfachnutzung eine geringere Umweltauswirkung gegenüber der energetischen Nutzung behält und erhöht, sollten vor allem Verbrennungsprozesse aber auch Logistik, Holzaufbereitung und Materialverluste optimiert werden. Neben der Bereitschaft aus dem Wirtschaftsbereich bedarf es auch dem strategischen Eingreifen der Politik auf europäischer und nationaler Ebene. Gesetzliche Rahmenbedingungen sollten stofflichen Verwertungspfaden insgesamt mehr Raum und einseitigen, beispielsweise energetischen Förderungen weniger Raum geben. Nur so kann das Potenzial der Kaskadennutzung voll ausgeschöpft werden.^{80,81} In Bezug auf die Ressourceneffizienz und damit assoziierte Umweltauswirkungen muss unbedingt berücksichtigt werden, dass eine verlagerte Nutzung von Altholz für stoffliche statt energetische Nutzung nicht dazu führt, dass durch fehlendes Altholz das qualitativ hochwertige Frischholz energetisch genutzt wird.

Ein bedeutendes Hindernis für die notwendige Verfügbarkeit von Altholz ist der aktuelle Prozess für dessen Sammlung und Qualitätssortierung. Das hohe Potenzial für qualitativ und quantitativ hochwertiges Altholz für eine hochstufige Kaskadennutzung, welches bei der Rückgewinnung von Baumaterial aus Gebäudeabbrüchen entsteht, wurde in dieser Studie theoretisch aufgezeigt. Damit Holz in die Kaskaden eingespeist werden kann, bedarf es jedoch einer sortenreinen Sammlung der Reststoffströme. Eine Quellsortierung, d. h. Sortierung am Ort des Anfalls, ist anzustreben. Wichtig ist auch hier die Festlegung in gesetzlichen Rahmenbedingungen. Ein wichtiger Schritt bei den gewerblichen Abfällen ist die Novellierung der GewAbf-V (§ 3 und § 8), die in einer verpflichtenden Erfassung und Sortierung von Altholz resultiert. Das Hinzufügen einer Kontrollpflicht und Recyclingquote in der GewAbf-V für getrennt gesammeltes Altholz könnte der wirtschaftlichen Unzumutbarkeit entgegenwirken. Eine höhere Wirtschaftlichkeit und einseitige Förderung der energetischen Nutzung behindert ein ressourceneffizienteres Wirtschaften mittels Kaskadennutzung. Die Weiterentwicklung von technischen Verfahren für eine Sortierung ist vielversprechend. Bereits heute können unter anderem durch Nah-Infrarot-Spektroskopie Biokunststoffe von fossilen Kunststoffen automatisiert getrennt oder Althölzer in die verschiedenen Altholzkategorien sortiert werden. Diese hochwertige Sortierung sollte in die

⁷⁸ Vgl. Ludwig, G., Gawel, E., Pannicke, N (2016)

⁷⁹ Vgl. Knauf, M. (2017)

⁸⁰ Vgl. Fehrenbach, H. et al. (2017)

⁸¹ Vgl. Ludwig, G., Gawel, E., Pannicke, N (2016)

Prozesse einer Kaskade implementiert werden und würde eine hochwertige und mehrstufigere Wiederverwendung des Rohstoffs Holz erlauben.⁸²

⁸² Vgl. Fehrenbach, H. et al. (2017)

6 Flächeninanspruchnahme und Auswirkungen in Land- und Forstwirtschaft bei einer Steigerung der Holzbauquote (AP 1.6)

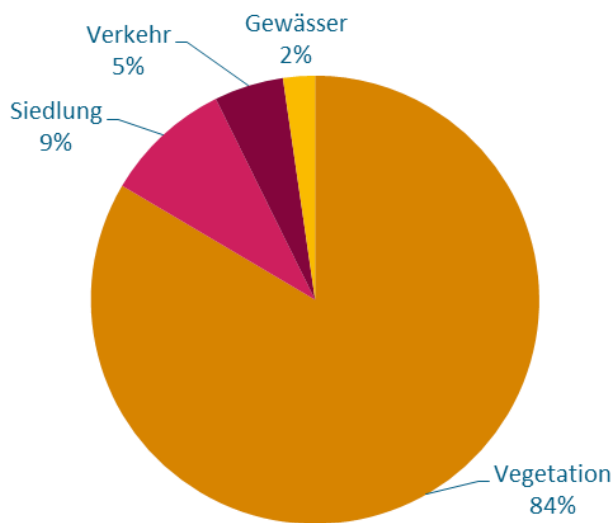
Kapitel 4.1 untersucht die Potenziale zur Steigerung der Holzbauquote unter Modellierung verschiedener Szenarien. Der Vergleich verschiedener Kombinationen aus Waldbehandlungs- und Holzverwendungsszenarien zeigt, dass die Nachfrage nach Nadelholz das inländische Angebot übersteigt und somit zu Nadelholzimporten führt. Dieses Kapitel untersucht, welche theoretischen Möglichkeiten für eine Vergrößerung von forstwirtschaftlichen Flächen bestehen, um das Angebot an inländischen Hölzern zu erhöhen. Dafür werden in Kapitel 6.1 der aktuelle Stand der Flächeninanspruchnahme der Hauptnutzungsarten sowie deren zeitliche Entwicklung dargestellt. In Kapitel 6.2 werden konkurrierende Nutzungsarten aufgezeigt sowie Möglichkeiten für eine Umnutzung von Flächen ausgewiesen, welche zu einer Erhöhung des Anteils an forstwirtschaftlichen Flächen führen könnten.

6.1 Status quo und zeitliche Entwicklung der Flächeninanspruchnahme in Deutschland

Die folgenden Abbildungen geben einen Überblick der aktuellen Flächenanteile verschiedener Nutzungsarten in Deutschland. Es werden die Flächen und prozentualen Anteile verschiedener Hauptnutzungsarten an der gesamten Bodenfläche dargestellt (Abbildung 48), ein detaillierter Einblick in die Flächenanteile der Vegetationsnutzungsarten (Abbildung 49) sowie in landwirtschaftliche Betriebe und ausgewählte landwirtschaftliche Hauptnutzungsarten (Abbildung 50) gegeben. Die Informationen zu den absoluten Flächen, bundesweit sowie regional nach Bundesländern gegliedert, sind tabellarisch aufgeführt (Tabelle 28 bis Tabelle 30).

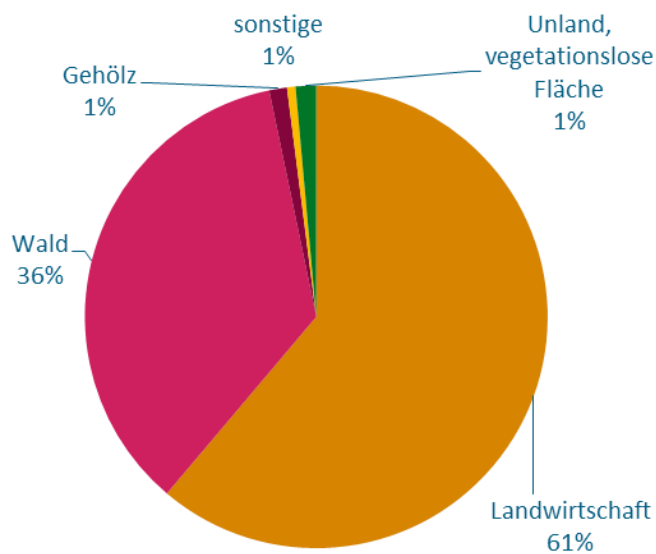
Die prozentualen Anteile der Bodenfläche in Deutschland (Abbildung 48) beinhalten 14 % Siedlungs- und Verkehrsflächen und knapp 2 % Gewässer (Kanäle, Seen, Flüsse). Mit 84 % nimmt die Vegetation den größten Anteil der Bodenfläche ein. Die Vegetationsfläche ist mit 61 % geprägt durch landwirtschaftliche Nutzung und mit 36 % durch Waldnutzung. Die restlichen 3 % können Gehölz, Unland und vegetationsloser Fläche (Abbauland, Felsen, ehemaliges Militärgelände und Abraumhalden) und sonstiger Nutzung (Heide, Moore, Sumpf) zugeschrieben werden (Abbildung 49).

Abbildung 48: Bodenflächenanteile nach tatsächlicher Nutzungsart, 2016



Daten: Statistisches Bundesamt (2017a)

Abbildung 49: Flächenanteile verschiedener Vegetationsnutzungsarten an der gesamten Vegetationsfläche, 2016



Die Gruppe „Sonstige“ beinhaltet die Vegetationsnutzungsart Heide, Moor und Sumpf.

Daten: Statistisches Bundesamt (2017a)

Betrachtet man die räumliche Verteilung der Waldflächen im Allgemeinen, so sind hohe Waldflächenanteile in siedlungsarmen, für intensive Landwirtschaft weniger geeigneten Mittel- und Hochgebirgslagen zu finden (siehe auch Abbildung 23).

Die regionale Verteilung (Tabelle 29) zeigt einen überdurchschnittlichen Waldanteil an der Vegetationsfläche für die Bundesländer Hessen (48 %), Rheinland-Pfalz (48 %) und Baden-Württemberg (45 %), das Saarland (43 %), Bayern (41 %), Brandenburg (40 %) und Thüringen (37 %). Den prozentual geringsten Waldanteil an der Vegetationsfläche haben Schleswig-Holstein (13 %), Mecklenburg-Vorpommern (25 %), Niedersachsen (26 %) und Sachsen-Anhalt (26 %).

Tabelle 28: Anteile der Nutzungsarten an der Bodenfläche 2016 nach regionaler Gliederung in Deutschland

Region	Bodenfläche gesamt [ha]	Siedlung [ha]	Verkehr [ha]	Vegetation [ha]	Gewässer [ha]
Deutschland	35.757.963	3.277.007	1.802.890	29.856.167	821.898
Baden-Württemberg	3.574.828	326.549	197.712	3.011.672	38.894
Bayern	7.054.203	528.019	330.844	6.074.347	120.992
Berlin	89.112	49.116	13.611	20.489	5.896
Brandenburg	2.965.438	202.939	110.310	2.553.057	99.132
Bremen	41.995	18.499	5.203	13.369	4.924
Hamburg	75.509	35.124	9.385	24.900	6.101
Hessen	2.111.567	194.739	143.680	1.744.052	29.096
Mecklenburg-Vorpommern	2.329.275	132.081	70.359	1.993.852	132.982
Niedersachsen	4.770.983	444.793	245.356	3.976.761	104.072
Nordrhein-Westfalen	3.411.274	560.219	239.731	2.546.791	64.533
Rheinland-Pfalz	1.985.800	168.204	120.919	1.668.480	28.197
Saarland	257.110	39.264	16.159	199.116	2.572
Sachsen	1.844.999	184.536	80.900	1.536.256	43.307
Sachsen-Anhalt	2.045.214	156.954	79.251	1.764.491	44.518
Schleswig-Holstein	1.580.420	140.106	68.952	1.294.835	76.526
Thüringen	1.620.237	95.865	70.519	1.433.699	20.154

Daten: Statistisches Bundesamt (2017a)

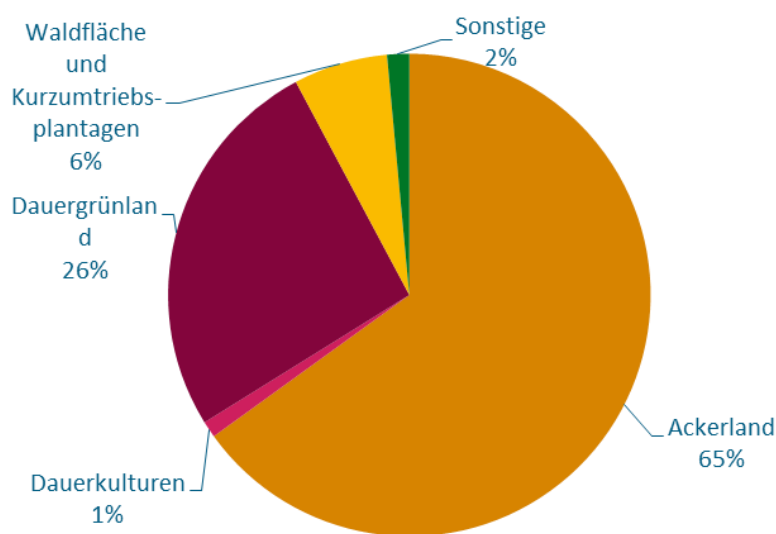
Tabelle 29: Anteile der Fläche für Vegetation und ihrer Nutzungsarten an der Bodenfläche 2016 nach regionaler Gliederung

Region	Vegetation gesamt [ha]	davon						
		Land- wirtschaft [ha]	Wald [ha]	Gehölz [ha]	Heide [ha]	Moor [ha]	Sumpf [ha]	Unland [ha]
Deutschland	29.856.167	18.263.736	10.617.013	370.233	60.902	81.129	36.932	426.222
Baden- Württemb.	3.011.672	1.618.933	1.352.564	17.462	1.285	2.007	302	19.118
Bayern	6.074.347	3.285.087	2.487.176	88.661	1.911	12.586	2.229	196.697
Berlin	20.489	3.750	15.752	662	4	45	54	222
Branden- burg	2.553.057	1.446.886	1.030.796	24.246	12.668	116	3.724	34.621
Bremen	13.369	11.929	461	444	66	30	247	192
Hamburg	24.900	17.663	4.016	1.882	610	47	208	473
Hessen	1.744.052	884.733	839.306	10.954	106	70	432	8.450
Mecklen- burg-Vorp.	1.993.852	1.442.651	490.225	20.194	1.684	2.884	12.804	23.409
Niedersach- sen	3.976.761	2.776.261	1.014.470	52.283	17.926	52.555	6.467	56.800
Nordrhein- Westfalen	2.546.791	1.631.835	849.507	42.487	4.967	1.698	1.505	14.793
Rheinland- Pfalz	1.668.480	818.428	805.440	39.580	333	82	514	4.103
Saarland	199.116	110.416	85.623	1.426	97	2	28	1.523
Sachsen	1.536.256	1.005.498	495.184	8.480	2.726	62	517	23.790
Sachsen- Anhalt	1.764.491	1.237.688	456.545	52.281	14.043	109	3.531	294
Schleswig- Holstein	1.294.835	1.088.390	162.014	5.457	2.280	8.801	4.204	23.691
Thüringen	1.433.699	883.590	527.936	3.733	196	34	166	18.045

Daten: Statistisches Bundesamt (2017a)

Auf den 61 % umfassenden Flächenanteilen der Landwirtschaft (Abbildung 49) dominieren der Ackerbau mit 65 % sowie die Dauergrünlandflächen mit 26 %, während 6 % der Betriebsflächen für Waldflächen und Kurzumtriebsplantagen verwendet werden (Abbildung 50). Von diesen landwirtschaftlich betriebenen Waldflächen können circa 0.5 % den Kurzumtriebsplantagen zugeschrieben werden.⁸³ Bezogen auf die regionale Gliederung der Betriebsflächen (Tabelle 30) sind die Ackerflächen vor allem in Sachsen-Anhalt (82 %), Thüringen (76 %), Mecklenburg-Vorpommern (76 %), Sachsen (73 %) Brandenburg (72 %) und Niedersachsen (72 %) überdurchschnittlich vertreten. Der Anteil der Betriebe mit Dauergrünflächen ist in den Bundesländern Saarland (52 %), Baden-Württemberg (37 %) und Hessen (35 %) überdurchschnittlich vertreten.

Abbildung 50: Flächenanteile landwirtschaftlicher Betriebe und ausgewählter Hauptnutzungsarten, 2017



Die Gruppe „Sonstige“ beinhaltet Betriebe ohne landwirtschaftlich genutzte Fläche.

Daten: Statistisches Bundesamt (2017a)

⁸³ Bundesamt für Statistik (2017c)

Tabelle 30: Flächenanteile (in 1000) landwirtschaftlicher Betriebe und ausgewählter Hauptnutzungsarten 2017 nach regionaler Gliederung

Region	Betriebsfläche gesamt [ha]	davon				Waldfläche und Kurzumtriebs- plantagen [ha]
		Landwirtschaftlich genutzte Fläche [ha]	Ackerland [ha]	Dauerkulturen [ha]	Dauergrünland [ha]	
Deutschland	18.097	16.687	11.772	199	4.715	1.143
Baden-Württemberg	1.577	1.419	819	50	549	139
Bayern	3.740	3.128	2.057	13	1.058	540
Berlin	2	2	1	0	1	.
Brandenburg	1.420	1.323	1.019	4	300	77
Bremen	9	8	2	-	6	.
Hamburg	17	15	6	2	7	1
Hessen	805	772	470	6	296	/
Mecklenburg-Vorpommern	1.419	1.346	1.075	3	268	51
Niedersachsen	2.604	2.587	1.880	19	689	/
Nordrhein-Westfalen	1.620	1.460	1.045	15	400	139
Rheinland-Pfalz	735	708	400	70	238	19
Saarland	79	77	35	0	41	.
Sachsen	959	901	705	5	191	42
Sachsen-Anhalt	1.220	1.176	1.000	3	174	34
Schleswig-Holstein	1.093	988	651	7	331	46
Thüringen	800	778	609	2	167	12

0 = weniger als die Hälfte von 1 in der letzten besetzten Stelle, jedoch mehr als nichts

- = nichts vorhanden

/ = keine Angabe, da Zahlenwert nicht sicher

. = Zahlenwert unbekannt oder geheim zu halten

Betriebsfläche insgesamt einschließlich Betriebe ohne landwirtschaftlich genutzte Fläche

Daten: Statistisches Bundesamt (2017b)

Die zeitliche Entwicklung für den Zeitraum 2000 bis 2016 zeigt, dass sich die Waldfläche um 0,8 % ausgeweitet hat⁸⁴. Die dritte Bundeswaldinventur 2012 des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft fasst zusammen, dass sich die Waldfläche zwischen 2002 und 2012 mit einer Zunahme von ca. 0,4 % nur gering verändert hat⁸⁵. Die Erweiterung der Waldfläche hat sich zum Teil auf ehemaligen Landwirtschaftsflächen und vor allem auf Flächen der Nutzungsart „Unland und vegetationslose Flächen“ (mit einem sehr geringen Flächenanteil an der Vegetationsfläche von 1 %; siehe Abbildung 49), wie ehemaligen Übungsplätzen oder ehemaligen Bergbauflächen und Abraumhalden, vollzogen.

Betrachtet man die zeitliche Entwicklung der landwirtschaftlichen Nutzfläche für den Zeitraum 2000 bis 2016 zeigt sich ein Rückgang um 2 % bezogen auf die Gesamtfläche. Dieser Rückgang resultiert vorrangig aus der Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen, vor allem im Umland städtischer Verdichtungsräume. Für eine Verringerung der Flächeninanspruchnahme durch Siedlung und Verkehr und für den Erhalt von ökologisch wertvollen Flächen hat sich die Bundesregierung im Rahmen der nationalen Nachhaltigkeitsstrategie⁸⁶ zum Ziel gesetzt, die Neuinanspruchnahme von Flächen für Siedlungen und Verkehr auf 30 Hektar pro Tag (gegenüber dem Durchschnitt von 120 Hektar pro Tag für die Jahre 1993 bis 2003) zu verringern. Für das Jahr 2050 fordern der Rat für Nachhaltige Entwicklung (RNE), der Rat der Sachverständigen für Umweltfragen (SRU) sowie der Naturschutzbund Deutschland e.V. (NABU) die Inanspruchnahme neuer Flächen auf null zu reduzieren. Die Veränderung der landwirtschaftlichen Nutzfläche resultiert zu einem weiteren, jedoch sehr geringeren Teil aus einem leicht wachsenden Waldanteil. Weitere Landwirtschaftsfläche fiel dem Tagebau zum Opfer und kann Jahrzehnte später nur teilweise durch Rekultivierung zurückgewonnen werden^{87,88,89}.

6.2 Auswirkungen und Folgen bei Erhöhung forstwirtschaftlicher Flächen

Wie beschrieben, wurden in Kapitel 4.1 verschiedene Kombinationen aus Waldbehandlungs- und Holzverwendungsszenarien untersucht, um Aussagen zum Potenzial für eine Steigerung der Holzbaurate treffen zu können. Eine gesteigerte Holzbaquote führt je nach Betrachtungsweise und Szenario vor allem zu einem erhöhten Bedarf an Nadelhölzern. Im Folgenden wird eine gesteigerte Holzbaquote ohne die Verwendung von Importhölzern mit einer Erhöhung des forstwirtschaftlichen Flächenanteils assoziiert. Es wird aufgezeigt, welche Nutzungsarten in Konkurrenz stehen würden und abgeschätzt, welche bestehenden Flächennutzungen für eine Umnutzung in Frage kommen würden.

6.2.1 Möglichkeiten für die Erhöhung forstwirtschaftlicher Flächen unter bestehenden Flächennutzungen

Bereits zum aktuellen Zeitpunkt konkurrieren viele Interessengruppen um die zur Verfügung stehende nutzbare und limitierte Fläche⁹⁰. Eine Erhöhung der forstwirtschaftlichen Flächen, welche aus der Kombination Steigerung der Holzbaquote und keine Importhölzer resultiert (siehe Kapitel 4.1), lässt eine Verstärkung des Konkurrenzdruckes und eine notwendige Umnutzung von Flächen anderer Hauptnutzungsarten (Siedlung, Verkehr, Gewässer; siehe

⁸⁴ Es ist zu berücksichtigen, dass seit 2016 Gehölz nicht mehr zur Waldfläche gezählt wird.

⁸⁵ Bundeswaldinventur (2018)

⁸⁶ Bundesregierung (2016)

⁸⁷ Vgl. UBA (2018a)

⁸⁸ Vgl. UBA (2018b)

⁸⁹ Vgl. UBA (2018c)

⁹⁰ Vgl. BMEL (2018)

Abbildung 48), Vegetationsnutzungsarten (Landwirtschaft, Unland und vegetationslose Flächen, Gehölz sowie Heide, Moor und Sumpf; Abbildung 49) sowie landwirtschaftlicher Betriebe (Ackerland, Dauergrünland, Dauerkulturland; Abbildung 50) vermuten.

Bezogen auf die Hauptnutzungsarten Landwirtschaft, Wald, Gewässer sowie Siedlung und Verkehr (Abbildung 48) und der aktuellen Entwicklung einer zunehmenden Flächeninanspruchnahme für Siedlung und Verkehr wird deutlich, dass konkurrierende Flächennutzung derzeit vor allem durch diese Nutzungsart besteht. Diesem Umstand wird durch definierte Maßnahmen in der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie⁹¹ Sorge getragen und eine Reduktion der Siedlungs- und Verkehrsflächen auf 30 Hektar pro Tag angestrebt. Eine Umnutzung der bestehenden „Siedlungs- und Verkehrsflächen“ (14 %) wird als derzeit unrealistisch erkannt, da lediglich die Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsflächen begrenzt werden soll.

Eine Umnutzung des Flächenanteils „Gewässer“ (2 %) ist ebenfalls unrealistisch und nicht erwünscht, da es sich um zu schützende und auszubauende Flächen handelt.⁹²

Betrachtet man den Flächenanteil „Vegetation“ (84 %) und die Anteile der Vegetationsnutzungsflächen (Abbildung 49) stehen die landwirtschaftlich genutzten Flächen (61 %) weiterhin unter zunehmendem Druck durch weltweit steigende Nachfrage nach Lebensmitteln tierischen Ursprungs und nach pflanzlicher Biomasse. Bereits jetzt stehen die Flächen für den Anbau von Futtermittel-, Nahrungsmittel- und Energiepflanzen in direkter Konkurrenz.⁹³

Die Dauergrünlandflächen (26 % der landwirtschaftlich genutzten Betriebe; Abbildung 50) werden intensiv oder extensiv zur Nahrungs- und Futtermittelherstellung und zur Gewinnung von Biomasse für die Energieerzeugung verwendet. Darüber hinaus wird ihnen ein herausragender Wert für die biologische Vielfalt, Natur- und Umweltschutz sowie Erholungsraum zugeschrieben. Flächenumnutzungen in der Landwirtschaft gingen im Zeitraum 1999 bis 2013 fast vollständig zu Lasten des Dauergrünlandes. Von 2003 bis 2012 betrug der absolute Verlust des Dauergrünlandanteils ca. 5 %. Die Grünlandflächen sind bereits zum jetzigen Stand durch Interessenkonflikte innerhalb der Landwirtschaft gefährdet, z. B. wegen der fortschreitenden Intensivierung der Viehhaltung und durch die Umwandlung der Flächen in wirtschaftlich vorteilhaftere Ackerlandnutzungen. Mit der Reform der gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) der EU für die Förderperiode 2014 bis 2020 haben sich für den Erhalt des Grünlandes in Deutschland wichtige Änderungen ergeben.⁹⁴ Eine Umwandlung in Forstflächen wird daher zum jetzigen Stand als nicht realistisch betrachtet. Dem dominanten Flächenanteil des Ackerlands (65 %) und dessen momentane wirtschaftliche Relevanz wird für die Umnutzung in forstwirtschaftliche Fläche ein nur geringes Potenzial zugewiesen.

Die Umnutzung des Flächenanteils von „Gehölz und Moor, Heide, Sumpf“ (2 %) ist aufgrund des besonderen ökologischen Stellenwerts dieser Flächen und ihres geringen Anteils nicht gewünscht und somit ebenfalls unrealistisch.

Ein sehr geringes Potenzial in der Erhöhung forstwirtschaftliche Flächen liegt in dem mit 1 % ausgewiesene Flächenanteil für „Unland und vegetationslose Flächen“ (Abbauland, Felsen, ehemaliges Militärgelände und Abraumhalden; Abbildung 49). Diese Fläche ist nur sehr beschränkt und mit sehr hohem Aufwand für eine Umnutzung zu forstwirtschaftlicher Fläche geeignet, da die Bodenstruktur und die natürliche Bodenfunktion meist unwiderruflich beeinträchtigt sind. Nur eingeschränkt nutzbar für die Land- und Forstwirtschaft sind Flächen, die nach Beendigung

⁹¹ Vgl. Bundesregierung (2017)

⁹² Vgl. BMJV (2018)

⁹³ Vgl. UBA (2018d)

⁹⁴ Vgl. BfN (2014)

des Tagebaus entstehen. Diese Flächen stehen jedoch nicht unmittelbar, sondern erst nach deren Rekultivierung zur Verfügung.

Die Forstwirtschaft nimmt zudem durch die ökologische Ausgleichfunktion des Waldes und den positiven Einfluss auf die Grundwasserqualität vor allem für die Rekultivierung der Abraumhalde eine Schlüsselrolle für die Landschaftsentwicklung ein. So wurden 2009 die Rückgabeflächen zwischen 40 % bis 60 % forstlich rekultiviert.^{95,96}

Weiterhin muss bei einer Umnutzung zu forstwirtschaftlichen Flächen in einem langfristigen Zeitrahmen gedacht werden. Die Umtriebszeiten von Bäumen betragen Jahrzehnte, sodass eine Steigerung der Holzbaurate durch eine kurzfristige Umnutzung nicht unterstützt werden kann.

6.2.2 Auswirkungen der Erhöhung forstwirtschaftlicher Flächen und Folgen für die Umwelt

Die Flächennutzung durch den Menschen, z. B. durch sehr intensive Land- oder Forstwirtschaft, ist je nach Nutzungsart und Bewirtschaftung mit mehr oder weniger großen Auswirkungen auf die Umwelt und zum Teil mit unwiderruflichen Schäden (z. B. Verbrauch von Ressourcen, Ausrotten von Pflanzen- oder Tierarten) verbunden.

Für die Bewertung des Naturhaushalts wird der Indikator für Artenvielfalt und Landschaftsqualität verwendet. Er gilt als Schlüsselindikator für die Nachhaltigkeit von Landnutzungen und zeigt die Veränderungen ausgewählter Vogelarten an, die die wichtigsten Landschafts- und Lebensraumtypen in Deutschland repräsentieren. Indirekt bildet der Index die Entwicklung zahlreicher weiterer Arten und die Nachhaltigkeit in der Landnutzung ab.⁹⁷ Der Index über alle Landschafts- und Lebensraumtypen nimmt für den Zeitraum 1970 bis 2000 stark ab. Für 2030 wird ein Indexwert von 100 angestrebt. Für das Jahr 2013 lag dieser bei 68. Der Teilindex Wald zeigt eine Stabilisierung sowie einen geringfügigen Anstieg für den Zeitraum 2000 bis 2013, während vor allem für den Index im Typ Agrarland ein negativer Trend ersichtlich ist. Der Index deutet darauf hin, dass die Bewirtschaftung der Landschafts- und Lebensraumtypen eine zentrale Rolle für den Bestand repräsentativer Vogelarten ist.

Unabhängig von der Land- und Forstwirtschaft ist daher eine nachhaltige Bewirtschaftungsform der Bodenflächen anzustreben. Ziel ist generell eine umweltfreundlich gestaltete Nutzung, mit der die negativen Auswirkungen auf Boden, Luft, Wasser und Biodiversität so gering wie möglich gehalten, Ökosystemfunktionen und -leistungen sowie Kulturlandschaften erhalten und gleichzeitig die regionale Entwicklung gefördert werden. Die Bundesregierung hat sich in der Nachhaltigkeitsstrategie sowie in der Biodiversitätsstrategie das Ziel gesetzt, den Flächenanteil des ökologischen Landbaus von derzeit 6,5 % für das Jahr 2015 auf 20 % zu erhöhen und die Flächen der PEFC und/oder FSC zertifizierten Wälder von derzeit 74,5 % Waldfläche (siehe Kapitel 4.2) auf 80 % zu erhöhen.^{98,99,100}

⁹⁵ Vgl. LMBV (2009)

⁹⁶ Für die landwirtschaftliche Rekultivierung ist die Bodenqualität vor dem Abbau relevant, da der abgebaute Boden für die Rekultivierung verwendet wird. Ist sie von hoher Qualität, kann eine gut rekultivierte Fläche erst nach 20 bis 30 Jahren ihr volles landwirtschaftliches Ertragspotenzial erreichen.

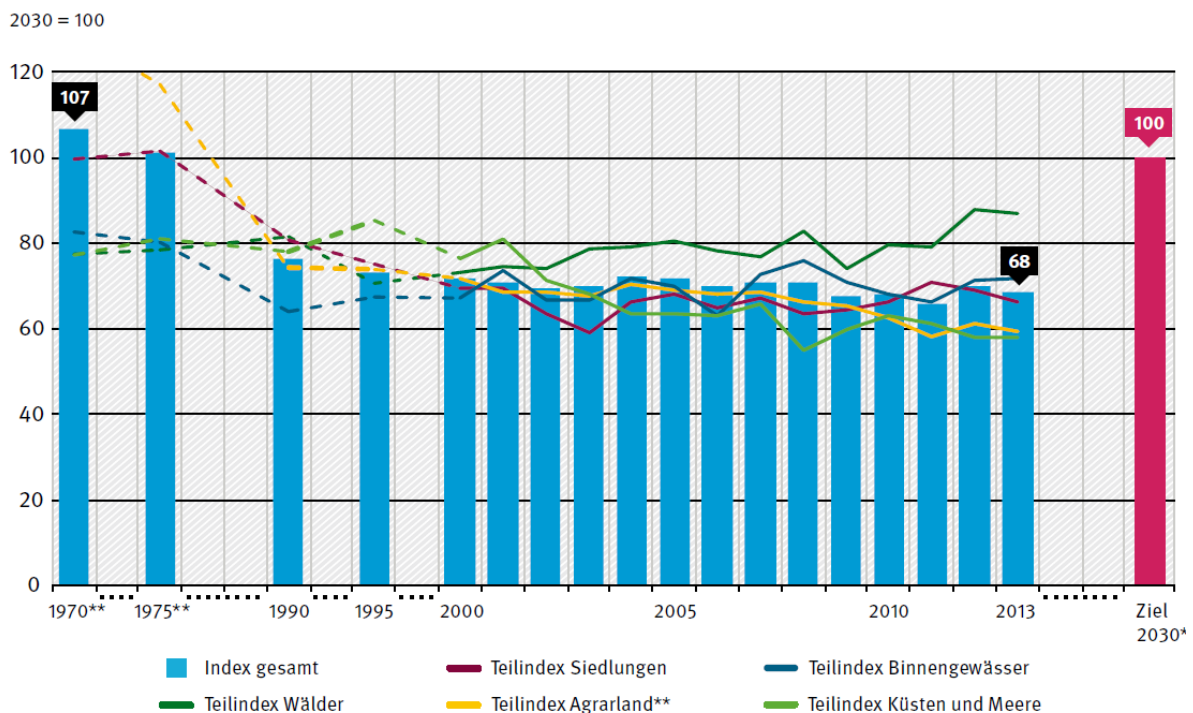
⁹⁷ Vgl. UBA (2017)

⁹⁸ Vgl. Bundesregierung (2016)

⁹⁹ Vgl. BMU (2007)

¹⁰⁰ Vgl. UBA (2017)

Abbildung 51: Bestand repräsentativer Vogelarten in verschiedenen Landschafts- und Lebensraumtypen



* Der Teilindex zu den Alpen ist derzeit über die gesamte Datenreihe ausgesetzt.

** Die Werte für 1970 und 1975 basieren auf Rekonstruktion; Wert Agrarland 1970: 128,8

*** Ziele der Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung

Quelle: UBA (2017)

Umnutzungen von Flächen haben neben wirtschaftlichen auch ökologische Auswirkungen, die sich tendenziell über die nationalen Grenzen ausweiten. So könnte z. B. eine Minimierung von Dauergrünlandflächen in einer Verringerung der inländischen Futtermittel resultieren. Diese müssten bei konstanter oder steigender Nachfrage von Futtermittel durch importierte Futtermittel ersetzt werden. Wie dieses Futtermittel im Exportland zur Verfügung steht (z. B. durch bestehendes Angebot, Umnutzung von Flächen, Rodung von Waldflächen) und welche Effekte oder Interessenkonflikte auf ökonomischer, gesellschaftlicher und ökologischer Ebene resultieren können, bedarf weiterer Forschungsarbeit.

Die nutzbare Bodenfläche ist limitiert und zum jetzigen Zeitpunkt nahezu vollständig den verschiedenen Nutzungsarten zugeordnet. Aktuell bestehen kaum Flächen für eine zusätzliche forstwirtschaftliche Nutzung. Daher wäre nur eine begrenzte Steigerung der Holzbauquote möglich. Eine generelle Aussage über die Auswirkungen und Folgen auf die Flächeninanspruchnahme durch eine gesteigerte Holzbauquote kann nicht getroffen werden. Unterschiedliche Faktoren, wie Flächenbedarf und vor allem Art der Bewirtschaftung (intensiv, extensiv, Monokultur, ökologisch) und Beschaffung (konventionell oder nachhaltig) sind von zentraler Bedeutung für die resultierenden Aus- und Wechselwirkungen. Entscheidend bei der Erhöhung von Flächenanteilen sowie der Umnutzung von Flächen ist, die Zielsetzungen der Nachhaltigkeitsstrategie sowie der Biodiversitätsstrategie konsequent umzusetzen. Damit verbunden ist die Ausweitung von mit PEFC und/oder FSC zertifizierten Waldflächen. Vor allem die mit der Umsetzung dieser Strategien verbundene Reduktion von konventioneller und intensiv betriebener Flächennutzung, von Monokulturen und von Kahlschlägen würde die negativen Auswirkungen auf die Umwelt begrenzen oder reduzieren können.

Es besteht weiterer Forschungsbedarf, wie hoch der zukünftige Flächenbedarf der einzelnen Nutzungsarten ist. Daraus könnten potenzielle Umnutzungsflächen ermittelt werden. Wesentlich ist die Berücksichtigung zukünftiger Entwicklungen in, unter anderen, den Bereichen Demographie, Klima, Umwelt, planetare Grenzen, Biodiversität, Politik und Wirtschaft. Die Betrachtung der Umweltauswirkungen muss zudem eine nationale und internationale Betrachtungsweise beinhalten und die planetaren Grenzen im Gesamten berücksichtigen.

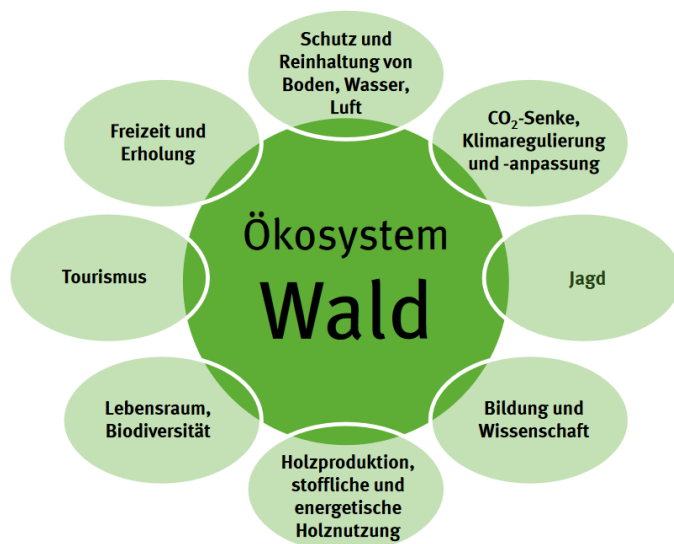
7 Implikationen der Waldnutzung (AP 1.7)

7.1 Funktionsvielfalt des Waldes

Mehr als ein Drittel der Vegetationsfläche in Deutschland ist mit Wald bedeckt (Abbildung 49). Der Wald bildet mit seiner biologischen Vielfalt ein bedeutendes Ökosystem, dessen Leistungen dem Menschen in verschiedenen gesellschaftlichen, ökonomischen und ökologischen Bereichen dienen. Die unterschiedlichen Funktionen des Waldes sind in Abbildung 52: Die Funktionen des Ökosystems Wald dargestellt und beinhalten unter anderem Lebensraum und Biodiversität, Freizeit und Erholungsraum, Rohstofflieferant, Tourismus oder Schutz und Reinhaltung von Boden, Wasser und Luft sowie Kohlenstoffdioxidsenke. Die Leistungsfähigkeit der Funktionen hängt maßgebend von der forstwirtschaftlichen Behandlung des Waldes ab. Um bewirtschaftungsbedingte Risiken zu vermeiden und Ökosystemleistungen zu erhalten, ist eine nachhaltige und umweltgerechte Waldwirtschaft umzusetzen. Dies bedingt eine naturnahe Forstwirtschaft mit standortgerechten, natürlich vorkommenden Arten und einem möglichst hohen Anteil an Jungbestand, der sich aus selbständiger Saat umstehender Bäume entwickelt hat. Werden intakte und stabile Waldökosysteme durch anthropogene Einflüsse, zum Beispiel auf das Klima oder den Nährstoff- und Wasserkreislauf, geschädigt, so ist deren Wiederherstellung nur über einen langen Zeitraum möglich.¹⁰¹

Dieses Kapitel fokussiert auf den Beitrag der Waldnutzung zum Klimaschutz durch dessen Potenzial, Kohlendioxid (CO₂) zu speichern und so als CO₂-Senke zu fungieren und Treibhausgasemissionen zu reduzieren, denn der Klimawandel ist eine der größten Herausforderungen unserer Zeit. Mit dem Klimaschutzabkommen von Paris hat die Staatengemeinschaft zu einem aktiven Handeln für die Beschränkung des Temperaturanstiegs um 2 °C bis zum Jahr 2100 aufgerufen.

Abbildung 52: Die Funktionen des Ökosystems Wald



Quelle: UBA (2015, <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/nachhaltige-waldwirtschaft#textpart-2>, Zugriffsdatum 01.11.2018)

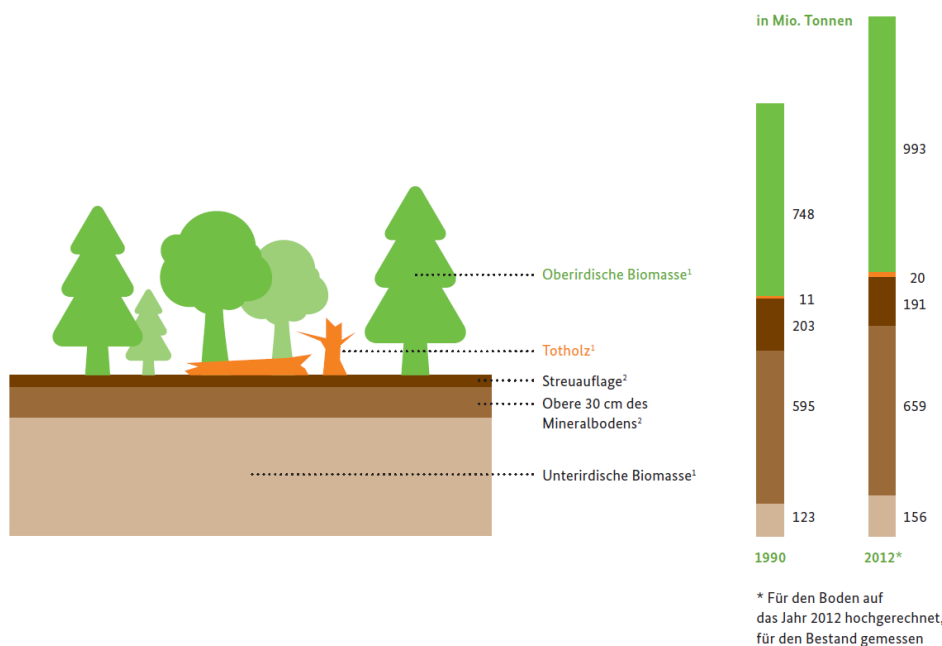
¹⁰¹ Vgl. UBA (2016)

7.2 Auswirkung der Waldnutzung auf Kohlenstoffspeicherung und Treibhausgasemissionen

Bäume binden das Treibhausgas CO₂ im Holz. Neben der lebenden Biomasse leisten auch die weiteren Bestandteile des Waldes, wie Totholz, Boden und abgestorbenes Pflanzenmaterial, einen Beitrag zur CO₂-Speicherung. Eine Veränderung der Waldfläche, das Wachstum der Bäume und die Bewirtschaftung des Waldes beeinflussen das CO₂-Speicherpotenzial und somit den Umfang seiner CO₂-Senkenwirkung.

Anhand der dritten Bundeswaldinventur wurde für Deutschland im Zeitraum 2002 bis 2012 der CO₂-Vorrat des Waldes abgeschätzt. Das gebundene CO₂ ist für diesen Zeitraum um knapp 20 % gestiegen. Der absolute Wert ist in der lebenden Biomasse und im Totholz von 882 Mio. Tonnen auf 1.169 Mio. Tonnen sowie in Streulage und Mineralboden von 798 Mio. Tonnen auf 850 Mio. Tonnen CO₂ gestiegen. Abbildung 53 veranschaulicht die Anteile der einzelnen Komponenten. Da die Holznutzung kleiner als der Zuwachs war, bildete der Wald eine CO₂-Senke und entlastete die Atmosphäre mit einer Minderung der CO₂-Emissionen um circa 6 %¹⁰². Auch Holzprodukte bilden einen CO₂-Speicher. Durch ihre Verwendung wird die Speicherung des in den Bäumen gebundenen CO₂ bis zur energetischen Nutzung oder dem biologischen Abbau des Materials verlängert.

Abbildung 53: Kohlenstoffvorräte im Wald gegliedert nach oberirdischer und unterirdischer Biomasse, Totholz, Streuauflage und Mineralboden



¹ Daten der Bundeswaldinventuren 1987, für die neuen Länder ergänzt aus dem Datenspeicher Wald, 2002 und 2012

² Bodenzustandserhebung im Wald

Quelle: BMEL (2014)

Die Verwendung von Holz hat zudem durch die Substitution energieintensiver fossiler Rohstoffe und Energieträger ein wesentliches Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen. Dies kann durch die energetische Substitution, d. h. Holzverbrennung anstatt Verbrennung von endlichen fossilen Energieträgern, sowie durch stoffliche Substitution, d. h. durch Verwendung von

¹⁰² Vgl. BMEL (2014)

Holzprodukten, entstehen. Holzprodukte benötigen bei ihrer Herstellung und Entsorgung in der Regel weniger Energie als Produkte basierend auf anderen Materialien.

Tabelle 31 zeigt eine Abschätzung des Beitrages der deutschen Forst- und Holzwirtschaft zum Klimaschutz für das Jahr 2014. Dabei werden die Leistungen durch „Waldspeicher“, „Holzproduktspeicher“, „Stoffliche Substitution“ und „Energetische Substitution“ differenziert und ausgewiesen. Der Waldspeicher trägt 45 %, die Substitutionen tragen insgesamt 52 % und der Speicher durch Holzprodukte trägt 3 % zur gesamten Treibhausgasreduktion bei. Der Beitrag der Substitution übersteigt den des Waldspeichers leicht und liegt deutlich über dem des Holzproduktspeichers. Der Substitutionseffekt birgt damit substanzielles Potenzial zur Minderung der Treibhausgasemissionen. In Deutschland wurden im Jahr 2014 die Gesamtemissionen der Treibhausgase durch diese kompensierende Wirkung der Forst- und Holzwirtschaft um etwa 14 % gesenkt.¹⁰³

Tabelle 31: Beitrag der deutschen Forst- und Holzwirtschaft zum Klimaschutz in Mio., 2014

Beitrag gesamt [t CO ₂ /Jahr]	Waldspeicher [t CO ₂ /Jahr]	Holzproduktspeicher [t CO ₂ /Jahr]	Stoffliche Substitution [t CO ₂ /Jahr]	Energetische Substitution [t CO ₂ /Jahr]
127*	58	3	30	36

*Dies entspricht ca. 14 % der gesamten Treibhausgasemissionen von 903 Mio. t CO₂-Äquivalent

Quelle: BMEL (2017)

Das Bauen mit Holz hat durch die Verwendung von Holzprodukten aber auch durch die stoffliche Substitution energieintensiverer Materialien aufgrund der langen Lebensdauern von Gebäuden einen großen Anteil am Einsparungseffekt¹⁰⁴. Die Substitutionspotenziale lassen sich auf Gebäudeebene nach jenen der Konstruktion und jenen des Ausbaus unterteilen. Essenzielle Differenzen in den Treibhausgasemissionen können bei der Konstruktion durch eine Substitution von mineralischen Rohstoffen durch Holz entstehen. Für ein EFH mindern sich die Treibhausgasemissionen zwischen 35 % und 56 %, beim MFH können zwischen 9 % und 48 % der Treibhausgasemissionen eingespart werden. Beim Ausbau (Bodenbeläge, Fenster, Türen, Fassadenbekleidung), welcher sowohl bei Neu- als auch bei Bestandsbauten relevant ist, kann durch den Einsatz von Holzprodukten eine Reduktion der Treibhausgasemissionen von 10 % bis 25 % realisiert werden.¹⁰⁵

Für eine ganzheitliche Betrachtung dieser CO₂-Einsparungseffekte muss die Nutzungsintensität von Holz und die Geschwindigkeit des Holz- bzw. Waldwachstums berücksichtigt werden. Eine nachhaltige Produktion und Nutzung von Holz scheint zu einer Optimierung der CO₂-Bilanz zu führen und sich somit positiv auf die Einsparung klimawirksamer Treibhausgase auszuwirken¹⁰⁶. Ziel ist, dass der Wald eine CO₂-Senke ist, d. h. die Holznutzung geringer als der Zuwachs ist und somit mehr CO₂ vom Wald aufgenommen als abgegeben wird. Für das langfristige Erhalten dieses Ziels wird vor allem nachhaltig produziertes Holz aus strukturreichen Mischwäldern ein hohes Potenzial zugeschrieben. Diese Holzprodukte können Materialien und Energieträger

¹⁰³ Anmerkung: Im Jahr 2002 wurden 10 % der verkehrsbedingten CO₂-Emissionen durch die CO₂-Bindung in Holz kompensiert. (Weimar und Jochem, 2009)

¹⁰⁴ Vgl. Weimar und Jochem (2009)

¹⁰⁵ Vgl. Hafner et. al. (2017)

¹⁰⁶ Vgl. Rüter et. al. (2011)

basierend auf fossilen Ressourcen zunehmend ersetzen, endliche Ressourcen schonen und gleichzeitig das Klima schützen.^{107,108}

Wald- und Holzprodukte aus nachhaltiger Forstwirtschaft beinhalten demnach ein bedeutendes Potenzial für die Speicherung von CO₂ und die Reduktion der Treibhausgasemissionen. Diese Auswirkungen haben eine wesentliche Bedeutung für die Erreichung der Klimaziele.

¹⁰⁷ Vgl. BMEL (2017)

¹⁰⁸ Vgl. BMEL (2014)

8 Vergleichende Ökobilanzen von Massiv- und Holzhäusern (Arbeitspaket 2)

8.1 Grundlagen

8.1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

In vielen Szenarien wird für die Umsetzung des Klimaschutzplans 2050 im Bereich des nachhaltigen Bauens unter anderem von einer Substitution von Baustoffen ausgegangen. Neben verschiedenen recycelten Baustoffen fällt dabei auch ein besonderes Augenmerk auf Holz als nachwachsenden und damit ressourcenschonenden Baustoff. Viele der bislang veröffentlichten Ökobilanzen weisen für Holzhäuser große Vorteile beim Treibhauspotenzial aus, was einerseits auf die (längerfristige) Speicherung von CO₂ im Holz, andererseits auf die Substitution CO₂-intensiver Baumaterialien (z. B. Stahl-Beton) zurückzuführen ist.

Es stellt sich die Frage, ob Holz für alle Gebäudenutzungstypen, Bauweisen, Regionen und Materialien bzw. für alle Anwendungsfälle als allgemeine Baustoffalternative in Deutschland empfohlen werden kann. Durch aktuell veröffentlichte Ökobilanzen, die sich mit dem Vergleich von Bauweisen beschäftigen, lässt sich diese Fragestellung nur schwer abschließend klären. Oftmals sind Studien interessensgesteuert, die Stellschrauben, die eine Ökobilanz beeinflussen, komplex, die Datengrundlagen unterschiedlich und es steht jeweils eine spezielle Fragestellung im Vordergrund.

Das Literaturreview von Studien mit vergleichenden Ökobilanzen, in denen die Massiv- mit der Holzbauweise verglichen wird, soll nachfolgend eine Gesamtübersicht bieten. Es werden die in Kapitel 1 benannten Forschungsfragen beantwortet und dabei die wichtigsten Stellschrauben zur Beeinflussung der Ergebnisse und Anforderungen für einen sinnvollen Vergleich der Bauweisen aufgezeigt sowie weiterer Forschungsbedarf benannt.

Da Studien aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher Randbedingungen untereinander nur schwer vergleichbar sind, werden für die genannten Fragestellungen nur Studien herangezogen, die beide Bauweisen betrachten. Ergänzend wurden Studien ohne vergleichende Ökobilanzen herangezogen, um Aspekte der Innenraumluftqualität, der Landnutzung und des Nachwuchspotenzials von Holz anzusprechen.

8.1.2 Ökobilanzierung von Gebäuden

8.1.2.1 Entstehung

Die Erstellung von Ökobilanzen für Produkte wurde in den 60er und 70er Jahren mit dem Ziel entwickelt den Energieverbrauch und Rohstoffbedarf zu reduzieren. Seitdem wurde das methodische Vorgehen stark weiterentwickelt. Speziell für die Betrachtung von Baukonstruktionen bzw. Gebäuden werden Ökobilanzen hingegen erst seit ca. 15 Jahren intensiv genutzt.

Im Vergleich zur Bilanzierung von einzelnen Produkten und Prozessen wird in Botasso (2014) angemerkt, dass eine Ökobilanz für ein gesamtes Gebäude sehr komplex ist und bis heute eine Herausforderung darstellt. Das liegt zum einen an der hohen Lebensdauer bzw. dem erforderlichen langen Betrachtungszeitraum und den damit einhergehenden Ungewissheiten bei den beeinflussenden Parametern. Zum anderen muss bei einem Gebäude eine Vielzahl verwendeter Materialien und Prozesse bilanziert werden.

Die Ökobilanz wird in der Bauindustrie nach Botasso (2014) vor allem als Marketing-Instrument, für Nachhaltigkeitslabels und zur Reduzierung der Umwelteinflüsse genutzt. Anwender sind vor allem Projektentwickler und Fachplaner.

8.1.2.2 Normung

Die folgenden Normen ermöglichen ein einheitliches und transparentes Vorgehen zur Darstellung von Ökobilanzen auf Produkt- und Gebäudeebene.

DIN EN ISO 14040 – Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen

Die DIN EN ISO 14040 stellt die Grundsätze und Rahmenbedingungen für eine Ökobilanz auf. Sie untergliedert eine Ökobilanz in vier Phasen, deren Erarbeitung iterativ erfolgt. Sie geht auf diese erste Phase ein, die da lautet: Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen. Dabei gilt es auf die Angabe der beabsichtigten Anwendung, die Gründe der Durchführung, Erläuterungen der Zielgruppe und die Verwendung der Studie für öffentliche Vergleiche einzugehen.

DIN EN ISO 14044 – Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen

In der DIN EN ISO 14044 werden Anforderungen und Anleitungen bezüglich der Sachbilanzerstellung gegeben, bei welcher sämtliche Stoff- und Energieströme über den gewählten Lebensweg erfasst werden. Die Sachbilanz setzt sich zumeist aus folgenden Szenarien zusammen: Herstellungs-, Errichtungs-, Nutzungs- und Entsorgungsphase sowie Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze. Darauf folgt die Wirkungsabschätzung der potenziellen Umweltwirkungen der erfassten In- und Outputdaten. Sie schließt mit der Definition der Auswertung einer Ökobilanz ab.

DIN EN 15804 – Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte

Diese Norm wurde für die Bestimmung der Umweltwirkungen von Bauprodukten im Rahmen der Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden erarbeitet. Sie spezifiziert die Erstellung von Produktkategorie-Regeln für Baumaterialien, die die Mindestanforderungen für TYP III Umweltdeklarationen nach DIN EN ISO 14025 bestimmen und im Kern Ökobilanzen nach DIN EN ISO 14040/44 beinhalten. Besonderheit der DIN EN 15804 ist, dass eine Wiederverwendung, Rückgewinnung oder das Recycling eines Baustoffes als ergänzende Informationen außerhalb des Lebenszyklus des Produktes in einem eigenen Modul (Modul D) dargeboten werden. Ferner beschreibt die Norm die zu prüfenden Umweltwirkungskategorien, Berechnungsverfahren sowie Anleitungen zur Deskription der Ressourcennutzung und des Abfallaufkommens.

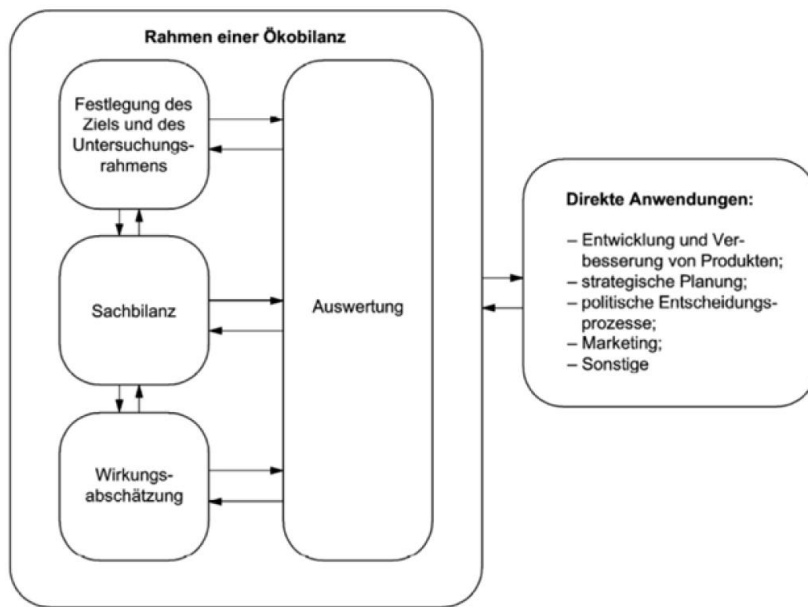
DIN EN 15978 – Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden – Berechnungsmethode

Diese Norm setzt die gleichen Abgrenzungen der Lebenszyklusphasen fest wie DIN EN 15804 für die Bauprodukteebenen. Für die Bestimmung der Umweltwirkungen der Herstellungsphase führt sie deshalb die Verwendung von DIN EN 15804-konformen Ökobilanzdatensätzen an. Zur Bestimmung der Umweltwirkungen der Energieverbräuche während der Gebäudenutzung beinhaltet die DIN EN 15978 detailliertere Vorgaben.

8.1.2.3 Methodik

Eine Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ist die „Zusammenstellung und Beurteilung der In- und Outputflüsse sowie der potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems im Verlauf seines Lebensweges“. Diese Norm untergliedert eine Ökobilanz in vier Phasen. Die Ausarbeitung erfolgt dabei iterativ, wie in nachfolgender Abbildung dargestellt wird.

Abbildung 54: Die Phasen einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040



Quelle: Achenbach, Rüter (2016): Ökobilanz-Daten für die Erstellung von Fertighäusern in Holzbauweise, S. 12.

1. Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Für die Definition des Ziels einer Ökobilanz sind Angaben bezüglich der beabsichtigten Anwendung, der Gründe für die Durchführung, der angesprochenen Zielgruppe sowie der Verwendung für öffentliche Vergleiche notwendig.

Der Untersuchungsrahmen ist mit dem Ziel festzulegen, die Prozesse zu definieren, welche in die Analysen inkludiert bzw. exkludiert werden. Ferner sind Umfang, Art (spezifisch, durchschnittlich) und Qualität der Datenerhebung festzulegen. Zuzüglich sind Abschneidekriterien und Allokationen sowie die funktionelle Einheit (Bezugseinheit) zu bestimmen.¹⁰⁹

2. Sachbilanzerstellung

Innerhalb der Sachbilanzphase werden die Datenerhebung und -berechnung sowie die Anwendung und Erläuterung der Zuweisung von Stoff- bzw. Energieflüssen und Emissionen zur gewählten Bezugseinheit durchgeführt. Dabei werden alle In- und Outputflüsse berücksichtigt, welche den verschiedenen Prozessen im Lebenszyklus des zu analysierenden Produktes zugeordnet werden können. Praktische Einschränkungen bei der Datenerhebung sind im Untersuchungsrahmen zu kennzeichnen und aufzuführen.

Darüber hinaus erfordert die Sachbilanz eine zusätzliche Datenberechnung mit Hilfe der gesammelten Daten und deren Validierung, damit ein korrekter mengenmäßiger Bezug zur betrachteten funktionellen Einheit hergestellt wird. Sollten Systeme betrachtet werden, bei welchen mehrere Produkte erzeugt oder verwertet werden, ist die Anwendung von Allokationsverfahren nötig.¹¹⁰

Gemäß EN 15804 sind folgende Lebenszyklusphasen für die Ökobilanz anzugeben, die in die Module A1 bis D aufgliedert werden:

Herstellungsphase

¹⁰⁹ Vgl. Ift-Richtlinie, S. 2.; Achenbach, H., Rüter, S. (2016)

¹¹⁰ Vgl. Achenbach, H., Rüter, S. (2016)

A1 – Rohstoffgewinnung und -verarbeitung sowie Verarbeitungsprozesse von als Input dienenden Sekundärstoffen (z. B. Recyclingprozesse)

A2 – Transport zum Hersteller

A3 – Herstellung

Errichtungsphase

A4 – Transport zur Baustelle (inkl. Transportabfälle)

A5 – Einbau in das Gebäude

Nutzungsphase

B1 – Nutzung oder Anwendung des eingebauten Produkts

B2 – Instandhaltung

B3 – Reparatur

B4 – Ersatz

B5 – Erneuerung

B6 – Energieeinsatz für das Betreiben des Gebäudes (z. B. Betrieb eines Heizsystems und anderer technischer Gebäudeausrüstungen)

B7 – Wassereinsatz für das Betreiben des Gebäudes

Entsorgungsphase

C1 – Rückbau, Abriss

C2 – Transport zur Abfallbehandlung

C3 – Abfallbehandlung zur Wiederverwendung, Rückgewinnung und/oder zum Recycling

C4 – Beseitigung

Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze

D – Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- und Recyclingpotenziale, als Nettoflüsse und Gutschriften (Vorteile) angegeben¹¹¹

3. Wirkungsabschätzung

In dieser Phase werden die potenziellen Umweltwirkungen der in der Sachbilanz erfassten In- und Outputdaten eingeschätzt. Dazu werden die ermittelten Sachbilanzdaten mit spezifischen Wirkungskategorien und -indikatoren verknüpft. Die Sachbilanz „kann eine iterative Prüfung des Ziels und des Untersuchungsrahmens der Ökobilanz-Studie enthalten, um festzustellen, ob die Zielsetzungen der Studie erreicht wurden, oder ob Ziel und Untersuchungsrahmen zu modifizieren sind, wenn in der Abschätzung festgestellt wird, dass sie nicht eingehalten werden können“ (ISO, 2006a: 27).

Folgende Bestandteile der Wirkungsabschätzung nach DIN EN ISO 14040 sind verbindlich:

- Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen
- Zuordnung der Sachbilanzergebnisse
- Berechnung der Wirkungsindikatorwerte
- Darstellung der Wirkungsindikatorwerte

Optionale Bestandteile der Wirkungsabschätzung:

- Normierung der Ergebnisse durch Verhältnisbildungen zu Referenzwerten

¹¹¹ Vgl. Ift-Richtlinie

- Ordnung und Gewichtung der Wirkungsindikatorwerte

4. Auswertung

Abschließend werden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung gegenübergestellt. Die Auswertung gliedert sich folgendermaßen:

- Identifizierung signifikanter Parameter
- Beurteilung
- Schlussfolgerung, Einschränkungen, Empfehlungen¹¹²

8.1.2.4 Allokation

Allokation bedeutet die Zuordnung von In- und Outputflüssen eines Prozesses oder eines Produktsystems zum untersuchten Produktsystem und zu einem oder mehreren anderen Produktsystemen bei Koppelproduktion, Recycling und Abfallentsorgung (DIN EN ISO 14040:200).¹¹³ Bei den im Rahmen der Gebäudezertifizierung nach BNB¹¹⁴ und DGNB¹¹⁵ verwendeten Datensätzen/EPDs aus der ÖKOBAUDAT werden diese nach DIN EN 15804:2015 angewandt. Für Modul D (Recycling) wird angenommen, dass die Sekundärrohstoffe das Produktsystem verlassen, in welchem sie als Reststoffe bzw. Abfälle zur Verwertung anfielen.

Kellenberger et al. (2009) kommen zum Ergebnis, dass die Erfassungstiefe der Bauteile mit den erforderlichen Nebenleistungen (z. B. Schrauben, Folien, Fußbodenleisten, Kleber) eine nicht unerhebliche Bedeutung bei der Betrachtung des Gesamtergebnisses einer Ökobilanz besitzt.

Sachbilanzen erfordern es, dass Basisprozesse innerhalb eines Produktsystems miteinander verbunden werden können. Nur wenige Prozesse bringen ein einziges Produkt hervor oder basieren auf einem linearen In- und Output. Vielmehr müssen in der Regel auch dem Prozess zu- und abgeführte Zwischen- und mehrere Endprodukte berücksichtigt werden. Daher werden die Material- und Energieflüsse sowie die Emissionen nach ISO 14040 und 14044 zugeordnet.

8.1.2.5 Funktionelle Einheit

Die funktionelle Einheit für Ökobilanzen ist gerade bei vergleichenden Ökobilanzen von Gebäuden von besonderer Bedeutung, um einen transparenten Vergleich zu ermöglichen.

Um zwei Bauweisen gegenüberstellen zu können, ist das gesamte Gebäude mit der gleichen funktionellen Qualität zu betrachten. Auch kann eine abschließende Aussage zur Gegenüberstellung von Holz- und Massivbau nur getätigt werden, wenn jeweils die gängigsten Konstruktionsweisen und Baustoffe innerhalb der jeweiligen Bauweise betrachtet werden.

Ein geeigneter Bezug wäre demnach die Bruttogrundfläche (BGF) des Gebäudes. Im Umkehrschluss ist ein Vergleich der Umweltauswirkungen bezogen auf die Masse eines Baustoffs oder die Bauteilfläche ungeeignet, da in diesen Fällen nicht das gesamte Gebäude betrachtet wird und entscheidende Aspekte unberücksichtigt bleiben.

Nach DIN EN 15804 und 15978 muss eine vergleichende Ökobilanz eine einheitliche funktionelle Einheit und Qualität aufweisen. Diese wird beschrieben durch:¹¹⁶

¹¹² Vgl. Ift-Richtlinie

¹¹³ Vgl. Hafner, Schäfer (2017)

¹¹⁴ Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen

¹¹⁵ Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V.

¹¹⁶ Vgl. Hafner, Schäfer (2017)

- ▶ Einhaltung der gesetzlichen Anforderungen an den Stand der Technik, Erfüllung der Standsicherheit und Tragfähigkeit, Brandschutzanforderungen
- ▶ Erfüllung der bauphysikalischen Mindestanforderungen inkl. EnEV
- ▶ Schallschutz für Luft- und Trittschall

Der Energieverbrauch in der Nutzungsphase nimmt bei Betrachtung der Umweltauswirkungen über alle Lebenszyklusphasen einen wesentlichen Anteil im Ergebnis einer Ökobilanz ein. Es ist somit besonders wichtig, dass dieses Modul bei einer vergleichenden Ökobilanz unbeachtet bleibt oder von einem identischen Energieverbrauch ausgegangen werden kann. Der Einfluss des Gebäudebetriebs auf das Gesamtergebnis einer Ökobilanz ist in Kapitel 8.4.7 aufgeführt.

Eine vollständig einheitliche funktionelle Äquivalenz für zwei Bauweisen in der Ökobilanzmodellierung ist in der Praxis kaum erzielbar. Unterschiede in den Bauweisen bei vergleichenden Ökobilanzen liegen in der Regel u. a. in folgenden Bereichen vor:

- ▶ Übererfüllung von bauphysikalischen Anforderungen (Schall, Raumakustik, Brandschutz, Wärmespeicherfähigkeit)
- ▶ Lebensdauer von Bauteilen, die den Betrachtungszeitraum übersteigen
- ▶ Unterschiede der Flächenverhältnisse Brutto zu Netto
- ▶ Gebäudegewicht und Auswirkung auf die Fundamente
- ▶ Abweichender Energieverbrauch in der Realität (trotz zuvor ermitteltem identischen Energiebedarf)

8.1.2.6 Datenbanken

Die Datenbank ÖKOBAUDAT ist weltweit die erste Datenbank für Ökobilanzen, die die Vorgaben der DIN EN 15804 berücksichtigt und kann für eine DIN EN 15978 konforme Auswertung der Umweltauswirkungen für gesamte Gebäude genutzt werden.

Die Datenmodule der ÖKOBAUDAT beinhalten Datensätze unterschiedlicher Herkunft. Es wird zwischen vier Kategorien unterschieden:

- ▶ Generic – Aus unterschiedlichen Quellen erhobener Datensatz mit Malusaufschlag
- ▶ Representative – Durchschnittsdatsatz ausgewählter Hersteller
- ▶ Average – Durchschnittsdatsatz einer Herstellergruppe
- ▶ Specific – Datensatz eines Herstellers

8.2 Vorgehen Review vergleichende Ökobilanzen

In den letzten 20 Jahren ist eine Vielzahl von Ökobilanzstudien im internationalen Raum erschienen, in denen die konventionelle Massivbauweise mit der Holzbauweise verglichen wird. Oftmals beschränken sich die Studien auf eine spezifische Teilfragestellung für eine Bauweise, Rahmenbedingung und Systemgrenze.

In Botasso (2014), Hafner, Schäfer (2017) und König (2017) wurden bereits Studien zu vergleichenden Ökobilanzen für die Holz- und Massivbauweise durchgeführt. Darin zeigte sich, dass die Ergebnisse der Studien nicht direkt miteinander verglichen werden können, da unterschiedliche Systemgrenzen, Datenbanken und Zielfragestellungen angewendet werden. Die Ergebnisse müssen deshalb immer in Zusammenhang mit den Rahmenbedingungen betrachtet werden. Daher merken u. a. Hafner, Schäfer (2017) weiteren Forschungsbedarf transparenter, standardisierter Studien an.

In Botasso (2014) wurde eine Meta-Analyse von Ökobilanzstudien im Gebäudesektor durchgeführt. Ziel war es, die Parameter zu ermitteln, die das Ergebnis einer Ökobilanz maßgeblich beeinflussen. Im Ergebnis wurden 16 Studien ausgewählt, die sich mit Ökobilanzen im Bausektor beschäftigen und deren Umweltauswirkungen von Gebäuden und Konstruktionen abbilden. Dabei fällt auf, dass sieben, also knapp die Hälfte der ausgewählten Studien, im Jahr 2012 erschienen sind und lediglich eine Studie aus dem deutschsprachigen Raum stammt. Es zeigte sich, dass der höchste Anteil der Primärenergie und des Treibhauspotenzials in der Nutzungsphase durch den Energieverbrauch verursacht wird. In der End-Of-Life-Phase werden die Umweltauswirkungen dagegen mit einem negativen Vorzeichen bilanziert. Eine Differenzierung der Quellen nach Bilanzierungsmethoden, die diesen Effekt auslösen können, war nicht Bestandteil der Studie. Als Hauptfaktoren, die eine Ökobilanz beeinflussen, werden der Standort, der Energiestandard, die Konstruktion und die Datenbasis genannt.

Das hier vorliegende Review wurde nach den folgenden fünf Schritten, wie sie auch in Botasso (2014) definiert werden, durchgeführt.

Schritt 1 – Kernfragestellung: Zunächst wurden die Kernfragen definiert, die durch das Review beantwortet werden sollen (siehe Kapitel 8.1.1). Die Hauptfragestellung war, welche Bauweise (Holz oder Massiv) in einem direkten Vergleich innerhalb einer Ökobilanz bessere Ergebnisse erzielt.

Schritt 2 – Relevante Quellen: Vor der Recherche wurden die Quellentypen definiert. Es sollten möglichst ausschließlich wissenschaftliche Studien aus Journalen oder Berichte von z. B. Universitäten herangezogen werden. Es wurden für die Hauptfragestellungen lediglich vergleichende Ökobilanzen zwischen Massivbau und Holzbau berücksichtigt. Für offene Fragestellungen weiterer Themen (siehe Kapitel 8.1.1) wurden im zweiten Schritt weitere Studien ohne Berücksichtigung der Ausschlusskriterien recherchiert. Die Quellen sollten in Englisch oder Deutsch verfasst sein, das gesamte Gebäude in einer Ökobilanz abbilden (und nicht lediglich auf Produktebene) und nicht älter als 20 Jahre alt sein. Im Anhang A.1 befindet sich die Literaturliste, die sich durch eine Stichwortsuche vergleichender Ökobilanzen im Bausektor ergeben hat und zur Vorauswahl für Schritt 3 diente. Es wurden insgesamt 75 Studien erfasst, welche nach ihrem Titel und verwendeten Schlagwörtern auf Inhalte bezüglich vergleichender Ökobilanzen von Holz- gegenüber Massivbau hinweisen.

Schritt 3 – Prüfung der Qualität der Studien: Es wurde eine Auswahl aus den im Schritt 2 gesammelten Studien getroffen, bei denen die Umweltauswirkungen eines Gebäudes in Holz- und Massivbauweise gegenübergestellt werden. Diese sind im Anhang A.2 aufgeführt. Für Themen, die erfahrungsgemäß nicht in vergleichenden Ökobilanzen behandelt werden (z. B. Innenraumluftqualität), wurden weitere Quellen ausgewählt. Im Ergebnis wurden 24 Studien zur weiteren Auswertung ausgewählt, die sich explizit mit dem Vergleich von Holz- gegenüber Massivbauweisen von Gebäuden befassen.

Schritt 4 – Zusammenfassung der Ergebnisse: Die wichtigsten Parameter aus den in Schritt 3 gewählten Studien wurden extrahiert und übersichtlich in Tabellenform (siehe Anhang A.2) gegenübergestellt. Dazu zählen die in den Kapiteln 8.3.1 und 8.3.2 aufgeführten Parameter, die entscheidend für die Aussagekraft einer vergleichenden Ökobilanz sind.

Schritt 5 – Resultate und Analyse: Die Ergebnisse wurden miteinander verglichen und etwaige Abweichungen bzw. Besonderheiten interpretiert. Es wurde eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse aus den Studien erstellt und weiterer Forschungsbedarf aufgezeigt.

Jede Studie ist anders aufgebaut und unterscheidet sich in ihren Rahmenbedingungen, unter denen Holz- und Massivbauweisen miteinander verglichen werden (bauliche Faktoren, methodische Unterschiede, unterschiedliche Schwerpunkte, getroffene Annahmen, Betrachtungsrahmen). Die Ergebnisse der einzelnen Studien können daher in vielen Fällen nicht ohne weiteres eins zu eins gegenübergestellt, sondern müssen vor dem Hintergrund der in der Methodik getroffenen Entscheidungen (Systemgrenzen, Annahmen, Vereinfachungen) interpretiert werden.

Infolgedessen kann ein Vergleich nur innerhalb einer Studie stattfinden. Übergreifend wurde deswegen ausgewertet, wie die Holz- relativ zur Massivbauweise je Studie und betrachtetem Umweltindikator abschneidet. Die Übersicht der prozentualen Abweichung der Umweltauswirkungen (Treibhauspotenzial, gesamte und nicht erneuerbare Primärenergie) zwischen den Bauweisen ist in den Kapiteln 8.3.4 und 8.3.5 für alle Studien aufgeführt.

Die Innenraumluftqualität wurde separat betrachtet, da sie nicht Bestandteil von vergleichenden Ökobilanzen ist.

In Kapitel 8.4 werden die wichtigsten Faktoren, die das Ergebnis einer vergleichenden Ökobilanz entscheidend beeinflussen können, beschrieben und Sensitivitätsanalysen, die in Studien für diese Parameter durchgeführt wurden, verglichen. Da sich die Studien in der Regel auf die Sensitivitätsanalyse eines bestimmten Parameters konzentrieren, kann ein Fazit lediglich innerhalb dieses Parameters gezogen werden.

8.3 Resultate vergleichender Ökobilanzen

In einer Analysematrix sind die wesentlichen Faktoren, die eine Ökobilanz beeinflussen, die baulichen Systeme, die in der Studie verglichen wurden, und die Auswertung der Umweltindikatoren eingetragen. Diese Matrix, zu finden im Anhang A.2, bildet die Basis für die Inhalte der nachfolgenden Kapitel.

8.3.1 Überblick Parameter des Ökobilanzmodells

Nachfolgend wird auf die wichtigsten Parameter eingegangen, die insbesondere für vergleichende Ökobilanzen von Bedeutung sind. Dabei wird auch angemerkt, wie diese in den untersuchten Studien behandelt werden.

8.3.1.1 Normung

Von den ausgewerteten Studien haben ca. 50 % der Autoren die in Kapitel 8.1.2.2 beschriebene Normenreihe mit den darin definierten Lebenszyklusphasen angewendet.

8.3.1.2 Lebenszyklusphasen

Die Auswahl der betrachteten Lebenszyklusphasen orientiert sich in den jüngeren Studien häufig an den Anforderungen der Ökobilanzierung aus dem Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) bzw. dem Zertifizierungssystem der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen

(DGNB). Nach DIN EN 15804 sind die Module A1 bis A5 (Herstellungs- und Errichtungsphase) verpflichtend zu berücksichtigen. In Bezug auf die Module A4, A5, B und C unterscheiden sich die Betrachtungsweisen. In den häufigsten Fällen werden die Module A1 bis A3, B2, B4, B6, C3, C4 und D betrachtet.

Die Verwendung dieser einheitlichen Zuweisung der Umweltauswirkungen auf die Module hat entscheidende Vorteile für den Vergleich. Besonders wichtig ist der Aspekt, dass das Modul D lediglich zusätzlich und informativ betrachtet wird. In Studien, die meist vor 2012 entstanden sind, sich nicht auf eine Norm beziehen und das Modul D in die Auswertung integrieren, führen die Recyclingpotenziale des Baustoffs Holz zu sehr großen Unterschieden. So erzielt Holz bei der Betrachtung der Leitindikatoren nur geringe Umweltauswirkungen. Dieses Vorgehen ist jedoch nicht standardisiert.

Nachfolgend werden einige Besonderheiten in Bezug auf Vereinfachungen bzw. Vernachlässigungen innerhalb einzelner Module aus den betrachteten Studien aufgeführt.

Modul A – Herstellungs- und Errichtungsphase

A1 bis A3 – In Hafner, Rüter (2017) wurde für ein EFH aus Holz berechnet, dass der Anteil des Verpackungsmaterials über den gesamten Lebenszyklus lediglich ca. 0,2 % ausmacht. Bei einem Massivbau beträgt der Anteil dagegen 0,5 %. Trotz der unterschiedlichen Verpackungstypen der Baumaterialien ist der Unterschied bei einem Vergleich von Massiv- und Holzbau vernachlässigbar. Kellenberger, Althaus (2009) kommen ebenfalls zu dem Ergebnis, dass der Anteil für Logistik und Baustellenprozesse geringfügig ist.

A4 und A5 – In Hafner, Rüter (2017) kommen diese Module im Rahmen einer Ökobilanz eines EFH in Massivbauweise auf einen Anteil von ca. 0,8 % der THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus. In den meisten Fällen werden sie aufgrund fehlender Datenbasis nicht bilanziert. In König (2017) werden die Module nicht betrachtet, da auf die Studie von Kellenberger und Althaus verwiesen wird, in der der Einfluss auf das Gesamtergebnis als sehr gering eingestuft wird.

Modul B – Nutzungsphase

B 2 – Die Instandhaltung enthält die Inspektion, Wartung und Reinigung des betrachteten Systems, wobei die Reinigung in der Regel nicht berücksichtigt wird.

B 6 – Das Modul des betrieblichen Energieeinsatzes wurde für den Vergleich der Bauweisen in einigen Studien nicht berücksichtigt, da von funktional äquivalenten Gebäuden mit analogen Energiestandards ausgegangen wird. Es existieren jedoch auch Studien, bei denen dieses Modul separat ausgezeichnet ist und Unterschiede entsprechend berücksichtigt werden.

Ein gleichwertiger Energiebedarf im Modul wird in den Studien im Wesentlichen durch gleiche U-Werte der Bauteilgruppen erreicht.¹¹⁷ Dass der z. B. nach EnEV berechnete Energiebedarf und der dadurch definierte Energiestandard vom tatsächlichen Verbrauch abweichen kann, da u. a. die unterschiedlich hohe Wärmespeicherfähigkeit der Bauteile Einfluss auf den Heizwärmebedarf besitzt, ist separat zu berücksichtigen und liegt außerhalb der Betrachtungsgrenze der Ökobilanz.

Das Modul B7 Wassernutzung wird in Ökobilanzen immer vernachlässigt, da keine Datenbasis vorhanden ist. Gleiches gilt für das Modul B2.¹¹⁸

¹¹⁷ Vgl. Hafner, Rüter (2017)

¹¹⁸ Vgl. Wolf et al. (2015)

Modul C – Entsorgungsphase

Es werden die Abfallbehandlung zur Wiederverwendung, Rückgewinnung bzw. Recycling (C3) sowie die Abfallbeseitigung (C4) betrachtet. Im Rahmen der deutschen Zertifizierungssysteme für nachhaltige Gebäude wird die Verwertung und Entsorgung wie folgt durchgeführt:

Für Holzbauteile wird der Entsorgungsweg der thermischen Verwertung gewählt. Umweltvorteile aus der thermischen Energierückgewinnung gehören dabei jedoch zu Modul D und liegen somit außerhalb der Systemgrenze.

Modul D – Vorteile und Belastungen außerhalb der Systemgrenze

Das Modul enthält Gutschriften und Lasten, die lediglich informativ und separat auszuweisen sind und in vielen Studien dementsprechend nur in einer separaten Variante in den Umweltauswirkungen auftauchen.

8.3.1.3 Umweltindikatoren

Im Rahmen einer Ökobilanz können eine Vielzahl von Umweltindikatoren ausgewiesen werden. Die zugewiesene Bedeutung der einzelnen Indikatoren ist jedoch unterschiedlich.

Der Fokus liegt grundsätzlich jedoch auf den beiden „Leitindikatoren“ Treibhauspotenzial und Primärenergiebedarf. Dies ist unter anderem darin begründet, dass sie maßgeblich für das Thema Klimaschutz sind, worin ein besonderes politisches Interesse liegt. In den Gebäudezertifizierungssystemen DGNB¹¹⁹ und BNB¹²⁰ sind diese beiden Indikatoren beispielsweise mit einem höheren Bedeutungsfaktor im Vergleich zu den folgend genannten Nebenindikatoren versehen. Viele Studien beschränken sich auf die Ausweisung dieser beiden Indikatoren. Aufgrund dessen konzentriert sich die Auswertung in diesem Bericht auf diese „Leitindikatoren“.

Primärenergie

Als Primärenergie bezeichnet man die Energie, die mit den ursprünglich vorkommenden Energieformen oder Energiequellen zur Verfügung steht. Hierbei lässt sich in Primärenergie aus nicht erneuerbaren Quellen (PENR) und Primärenergie aus erneuerbaren Quellen (PER) unterscheiden. Zu den nicht erneuerbaren Energiequellen zählen u. a. Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas, Holz aus Primärwäldern und Uran. Der Begriff der erneuerbaren Energiequellen beinhaltet u. a. Wasserkraft, Windkraft, Solarkraft, Holz aus nachhaltiger Forstwirtschaft und Geothermie.

Treibhauspotenzial (GWP)

Das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential) ist das Äquivalent der Treibhauswirkung von entsprechenden Gasen. Es steht stellvertretend für die Umweltwirkung „Erderwärmung“. Relevant sind dafür vor allem CO₂, CH₄ und N₂O sowie SF₆, PFC und HFC, deren Treibhauswirkung als CO₂-Äquivalent angegeben wird. Kohlendioxid als Bezugsgröße weist demnach einen Wert von 1 auf. Das Treibhauspotenzial ist aufgrund der Wirkungscharakteristik von Treibhausgasen und deren unterschiedlichen atmosphärischen Verweildauern ein zeitliches Integral über einen bestimmten Zeitraum.

Nebenindikatoren

Einzelne Studien weisen zudem Nebenindikatoren aus. Diese sind nach Vorlage des BNB folgende:

- ▶ Versauerungspotenzial (Acid Potential)

¹¹⁹ Deutsche Gesellschaft Nachhaltiges Bauen

¹²⁰ Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen

- ▶ Eutrophierungspotenzial (EP)
- ▶ Ozonschichtabbaupotenzial (ODP)
- ▶ Ozonschichtbildungspotenzial (POCP)

Eine Auswertung dieser weiteren Umweltauswirkungen wird in dieser Studie nicht vorgenommen, u. a. da nur wenige Studien diesbezüglich Informationen enthalten. Dazu gehören König (2017), König et al. (2015), Graubner et al. (2008) und Pohl (2016).

8.3.1.4 Verwendete Softwaretools

Zur Berechnung der Ökobilanzen der unterschiedlichen Bauweisen wurden unterschiedliche Softwaretools verwendet. Zum Einsatz kamen folgende Ökobilanz-Anwendungen:

- ▶ SimaPro 7
- ▶ GaBi 4 & 6
- ▶ LEGEP
- ▶ LTE-OGIP

Eine Sensitivitätsanalyse wird in einigen Studien für die darin enthaltenen Datenbanken durchgeführt. Die Auswirkungen unterschiedlicher Softwaretools bei gleicher Datenbank werden in keiner betrachteten Studie verglichen.

8.3.1.5 Verwendete Datenbanken

Folgende Datenbanken und Quellen werden für die Ökobilanzierung herangezogen

- ▶ ÖKOBAUDAT – kostenfrei zugänglicher Datensatz, zur Verfügung gestellt vom Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (BMI) zur Ökobilanzierung von Gebäuden inklusive Bewertung von Baumaterialien und Bau- und Transportprozessen
(<https://www.oekobaudat.de/>)
- ▶ WECOBIS – Ökologisches Baustoffinformationssystem, Informationen zu Bauproduktgruppen und Grundstoffen über gesundheitliche und umweltrelevante Faktoren, zur Verfügung gestellt vom Bundesministerium des Inneren, für Bau und Heimat (BMI)
(<https://www.wecobis.de/#&slider1=2>)
- ▶ Ecoinvent – Versionen 1.1, 2.2, 3.2
(<https://www.ecoinvent.org/database/database.html>)
- ▶ NREL/U.S. LCI – Datenbank zur Ökobilanzierung von Materialien, Produkten und Prozessen, in den USA bereitgestellt vom NREL (National Renewable Energy Laboratory)
(<https://www.nrel.gov/lci/>)
- ▶ Umweltproduktdeklarationen (EPDs)
- ▶ Informationen direkt vom Hersteller

- ▶ Andere wissenschaftliche Artikel
- ▶ Teils wurde keine Angabe zur Datenquelle gegeben oder auf eigene Berechnungen verwiesen.

8.3.1.6 Aktualität

Es wurde gezielt nach möglichst aktuellen Studien recherchiert (nach 2000). Je jünger die Studie ist, desto transparenter wird das methodische Vorgehen beschrieben. Zudem sind die Datensätze aktueller und die funktionelle Äquivalenz für den Vergleich ist deutlicher beschrieben.

8.3.1.7 Motivationsgrundlagen

Überwiegend liegt der Motivationshintergrund der betrachteten Studien in der Erarbeitung einer quantifizierbaren, wissenschaftlich nachgewiesenen Antwort zu der Frage, ob das umweltfreundliche Image des Holzbaus bei einem direkten Vergleich mit der Massivbauweise Bestand hat. Dazu werden Ökobilanzierungen von Varianten eines Modellgebäudes mit unterschiedlichen Umweltindikatoren durchgeführt.

8.3.1.8 Betrachtungszeitraum

Meist wird ein Zeitraum von 50 Jahren betrachtet. Dieser Betrachtungszeitraum wird u. a. auch als einheitlicher Standard in den Gebäudezertifizierungssystemen DGNB¹²¹ und BNB¹²² verwendet. Einige Studien weichen davon ab und nehmen 35, 60, 80 oder 100 Jahre an.

8.3.1.9 Lebensdauer von Bauteilen

Bei Vergleichen wird vereinfacht auf normierte Werte für die Lebensdauer von Bauteilen zurückgegriffen. Es existiert keine Sensitivitätsanalyse, welche den Einfluss von Lebensdauern aus individuellen produktspezifischen Erfahrungswerten aus der Praxis aufzeigt. König (2017) zeigt beispielsweise auf, dass ein Wärmedämmverbundsystem (WDVS) bei fachgerechter Ausführung eine voraussichtlich längere und von der Materialwahl unabhängige Lebensdauer besitzt.

Die Instandsetzungszyklen stellen einen großen Faktor beim Vergleich der Bauweisen dar. Hierbei existieren jedoch stark abweichende Ansätze. So wird die Lebensdauer entweder durch die Standardangaben zu Bauteilschichten aus dem „Leitfaden Nachhaltiges Bauen“ des BNB¹²³ verwendet oder es werden Annahmen aus der Erfahrung in der Praxis getroffen. Es besteht weiterer Forschungsbedarf zur Schaffung von realitätsnahen Grundlagen.

8.3.2 Überblick bauliche Parameter

Neben den Randbedingungen, Systemgrenzen und der Datenbasis im Ökobilanzmodell sind bei einem Vergleich der Bauweisen neben den Randbedingungen des Ökobilanzmodells die baulichen Einflussgrößen von Bedeutung bzw. können darüber bestimmen, welche Bauweise günstiger in den Umweltauswirkungen abschneidet. Im Folgenden werden die Wichtigsten benannt.

8.3.2.1 Gebäudetyp

Der Gebäudetyp und die Geschossigkeit entscheiden u. a. über die Anforderungen an den Brandschutz, die Statik und den Anteil der mineralischen Baustoffe, die unterhalb der Erdoberfläche erforderlich sind. In den betrachteten Studien wurden überwiegend Ein- und Mehrfamilienhäuser betrachtet. Dabei wird in Kapitel 8.4 eine Sensitivitätsanalyse hinsichtlich des Einflusses der

¹²¹ Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e.V.

¹²² Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen

¹²³ Leitfaden Nachhaltiges Bauen, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, 2016

Gebäudehöhe und des Kellergeschosses betrachtet. Eine Untersuchung, die analysiert für welchen spezifischen Gebäudetyp sich eine bestimmte Bauweise aus der Sicht der Ökobilanz am besten eignet, besteht nicht.

Neben dem real betrachteten Gebäude wird für die Gegenüberstellung oftmals ein virtuelles Gebäude mit einer abweichenden Bauweise erstellt. Welche Gebäude in den einzelnen Studien verwendet wurden, ist der Analysematrix aus Anhang A.2 zu entnehmen.

Eine Sensitivitätsanalyse zur Auswirkung der Kubatur des Gebäudes bzw. zum Verhältnis zwischen thermischer Hüllfläche und Energiebezugsfläche wurde in keiner Studie gefunden.

8.3.2.2 Standort

Im Großteil der betrachteten Studien befindet sich das modellierte Gebäude im deutschsprachigen Raum. Aussagen zum Einfluss des Standorts beziehen sich in der Regel ausschließlich auf unterschiedliche Transportentfernungen, vor allem für den Baustoff Holz.

8.3.2.3 Energiestandard

Als Grundvoraussetzung wird in einer Mehrzahl der Studien von einem einheitlichen Energieverbrauch in der Nutzungsphase ausgegangen. Dieser wird durch einen einheitlichen Energiebedarf im Rahmen einer EnEV-Berechnung bzw. durch einheitliche U-Werte der Modellvarianten sichergestellt. Dabei ist anzumerken, dass der reale Energieverbrauch, abgesehen von den standardisierten Randbedingungen, die bei einer Berechnung des Energiebedarfs angesetzt werden und nicht dem Nutzerverhalten entsprechen müssen, zwischen den Bauweisen abweichen kann. Gründe dafür sind beispielsweise die unterschiedliche Wärmespeicherfähigkeit der Baustoffe und charakteristische Wärmebrücken für bestimmte Konstruktionsweisen.

8.3.2.4 Thermischer Komfort, Schallschutz und Brandschutz

Grundsätzlich wird in den Studien von einer einheitlichen funktionellen Qualität ausgegangen, die sich auch auf die Aspekte der Bauphysik bezieht. Jedoch wird diese oftmals nicht für alle Aspekte konkret beschrieben. Teilweise wird nur die Gleichwertigkeit im Brandschutz und der thermischen Bauphysik benannt.

Im Schallschutz erreicht der Massivbau die erforderlichen Schallschutzwerte von internen Quellen beispielsweise in der Regel mit Hilfe der Masse. Im Holzbau wird der geforderte Schallschutz durch den geschichteten Bauteilaufbau erzielt. Diese Aspekte werden in der Ökobilanz dadurch berücksichtigt, dass das vollständige Gebäude mit vollständigen Bauteilaufbauten verglichen wird. In einer Betrachtung auf Produkt- oder Schichtebene würde dieser Aspekt unberücksichtigt bleiben.

8.3.2.5 Haustechnik

In den meisten Fällen wird beim Vergleich der Bauweisen lediglich von unterschiedlichen flächigen Bauteilen wie Außenwänden ausgegangen. Die Ausstattung für Sanitär-, Elektro- Telefoninstallationen sind pauschal gleichgestellt, ohne dass näher darauf eingegangen wird. Gleiches gilt für die Heizungskomponenten, Lüftungsinstallationen und Fensterflächenanteile. Eine Sensitivitätsanalyse konnte lediglich für die Heizwärmeerzeugung in König (2017) gefunden werden.

8.3.2.6 Weitere Vergleichsaspekte

Neben den bereits genannten gibt es bei näherer Betrachtung noch viele weitere Aspekte, die eine Sensitivitätsanalyse potenziell durchlaufen könnten.

Beispielsweise gehen Graubner et al. (2008), wie auch die übrigen Studien, bei der Betrachtung der Baustoffe und Haustechnik vom heutigen Stand der Technik und den derzeitigen Kenndaten zu Baustoffen aus. Für den Austauschzyklus werden künftige Änderungen in der Haustechnik und evtl. umweltfreundlichere Produktentwicklungen vernachlässigt.

Zudem sind die vergleichenden Gebäude oftmals fiktive Beispiele, die nicht hinsichtlich ihrer Optimierung von Statik und Konstruktion untersucht wurden.¹²⁴ König et al. (2017) führt an, dass eine leichte Bauweise aus Holz Unterschiede im Gebäudegewicht von 30 % bis 50 % verursachen kann. Die Studie von König et al. (2011) zeigt, dass der Materialbedarf in kg/m² Bruttogrundfläche (BGF) für Herstellung und Instandhaltung der Gebäude aus Holz zwischen 50 % und 65 % der Vergleichsgebäude aus konventionellen Baumaterialien beträgt, wodurch sich geringere Fundamentdicken ergeben können.¹²⁵ In den betrachteten Studien wird dieser Aspekt nicht angesprochen. König et al. (2017) gibt als Grund an, dass bei EFH nur selten Anpassungen an den Fundamenten aufgrund des Gebäudegewichtes getroffen werden.¹²⁶

8.3.2.7 Bauliche Systemgrenze

In der Regel wird ausschließlich die Summe der Konstruktionsbauteile miteinander verglichen. Der Innenausbau (Sanitär, Elektro- und Telefoninstallation sowie Heizungs-, Wasser- und Lüftungstechnik), die Außenanlagen und die Möblierung werden dabei vernachlässigt oder für alle Bauweisen gleichgesetzt.

In den Ökobilanzauswertungen von Hafner, Schäfer (2017) zeigt sich, dass für die THG-Emissionen bei Betrachtung des Lebenszyklus in den Modulen A bis C noch höhere Minderungspotenziale bei der konsequenten Verwendung von Holz erreicht werden könnten, wenn zusätzlich zu den Konstruktions- auch Innenausbaulemente wie Türen, Fenster, Fußböden usw. mitbilanziert würden. Diese Elemente sind unabhängig von der Gebäudekonstruktion und können in anderen Gebäuden wiederverwendet werden. Zudem ist das durch die Möblierung resultierende CO₂-Minderungspotenzial auch bei bestehenden Gebäuden von hoher Relevanz.¹²⁷

8.3.3 Standardisierung von Ökobilanzen für Gebäude

Die Grundvoraussetzung für einen nutzbaren Vergleich von Ökobilanzen ist, dass die Randbedingungen des Modells berücksichtigt werden, die in Kapitel 8.1 benannt sind. Jedoch werden die Standardisierung und das Ansetzen von einheitlichen Rahmenbedingungen oftmals nur teilweise erfüllt, sodass die Ergebnisse zu den gegenübergestellten Umweltauswirkungen immer direkt mit der Betrachtung unterschiedlicher Randbedingungen interpretiert werden müssen. Sensitivitätsanalysen einzelner Aspekte haben in verschiedenen Studien gezeigt, dass unterschiedliche Randbedingungen, wie z. B. die Betrachtungsdauer, das Ergebnis des Vergleichs zwischen der Holz- und Massivbauweise stark beeinflussen.

Die beschriebene, 2012 aktualisierte Normenreihe zur Definition der Anwendung einer Ökobilanz im Bausektor in Europa, ermöglicht bei deren Anwendung eine weitestgehend transparente und vergleichbare Ökobilanz. Dazu gehören die EN 15978, in der Berechnungsregeln auf Gebäudeebene enthalten sind, und die EN 15804 mit Berechnungsregeln auf Bauproduktebene. Die Lebenszyklusbetrachtung wird in die Module A bis D unterteilt, wobei der End-of-Life (EOL) in Modul C und das Recyclingpotenzial in Modul D getrennt sind. In Studien, in denen die Methoden der Normen nicht angewendet werden, werden die Module C und D oftmals nicht klar voneinan-

¹²⁴ Vgl. Graubner et al. (2008)

¹²⁵ Vgl. König (2011)

¹²⁶ Vgl. König (2017)

¹²⁷ Vgl. Hafner, Schäfer (2017)

der getrennt, wodurch ein Vergleich und eine Zurechnung der Prozesse kaum möglich sind. Viele Studien berücksichtigen jedoch aufgrund des Standorts, Veröffentlichungsjahres oder anderer Gründe nicht die aktuellen EN-Normen und sind daher nur eingeschränkt für einen transparenten Vergleich der Bauweisen geeignet.

8.3.4 Auswertung Umweltindikator Primärenergieverbrauch

Um die Ergebnisse des Vergleichs zwischen der Massiv- und Holzbauweise übersichtlich darstellen zu können, wurde für den Umweltindikator Primärenergiebedarf eine Analysematrix angelegt. Diese enthält die wichtigsten Randbedingungen des Ökobilanzmodells, Informationen zu den zu vergleichenden Gebäuden bzw. Bauweisen sowie das Ergebnis zum absoluten und relativen Primärenergiebedarf. Die Unterschiede zwischen den Bauweisen werden prozentual angegeben, da ein absoluter Vergleich aufgrund der bereits genannten Unterschiede im methodischen Vorgehen nicht möglich bzw. sinnvoll ist. Die Auswertung kann die Varianz der Abweichung zwischen den Bauweisen aufzeigen sowie eine Tendenz zum Einfluss unterschiedlicher Randbedingungen des Ökobilanzmodells geben.

Tabelle 33 zeigt dazu eine Übersicht der vergleichenden Studien, in der für die Holz- und Massivbauweise der Leitindikator Primärenergieverbrauch gegenübergestellt wird, inklusive einer Kennzeichnung der berücksichtigten Lebenszyklusphasen, des Gebäudetyps, der funktionellen Einheit und des Betrachtungszeitraums. Darin sind 72 Gegenüberstellungen von Ökobilanzmodellen mit einer Holz- und einer Massivbaukonstruktion aufgeführt.

Die Gegenüberstellungen beziehen sich, je nach Datenverfügbarkeit, entweder auf den Gesamtprimärenergieverbrauch (PET) oder zusätzlich auf den Anteil aus nicht erneuerbaren Energiequellen (PENR). Bei den untersuchten Gebäuden handelt es sich mehrheitlich um Ein- und Mehrfamilienhäuser in jeweils unterschiedlichen Ausführungen. Vereinzelt wurden Bürogebäude und weitere Nutzungstypen betrachtet.

Der grundlegende Parameter, der bei einem Vergleich von Ökobilanzen zu berücksichtigen ist, ist die Systemgrenze bzw. die betrachteten Lebenszyklusphasen. In Tabelle 33 wird deutlich, dass die Bandbreite der berücksichtigten Lebenszyklusphasen in den Studien sehr groß ist.

Daher wurden in Tabelle 32 die Ökobilanzmodellvergleiche aus den Studien den drei Systemgrenzen Modul A, Module A bis C und Module A bis D zugeordnet. Es zeigt sich eine hohe Varianz in der prozentualen Abweichung des Treibhauspotenzials beim Vergleich der Holz- mit der Massivbauweise.

Tabelle 32: Abweichung Primärenergieverbrauch der Holz- ggü. der Massivbauweise in %

Lebenszyklusphase	PE gesamt	PE nicht erneuerbar
Modul A	-55 % bis +8 %	-9 % bis -49 %
Modul A bis C	-14 % bis +34 %	-53 % bis +3 %
Modul A bis D	-143 % bis +3 %	-57 % bis -13 %

Daten: eigene Darstellung

Modul A

In Modul A ist die Studie von Graubner et al. (2008) die einzige, bei der die Holzbauweise bei der Gesamt-Primärenergie höhere Werte als die Massivbauweise erzielt (+8 %). Bei der Betrachtung der nicht erneuerbaren Primärenergie relativiert sich dieser Wert jedoch wieder. Dabei schnei-

det auch in dieser Studie die Holzbauweise mit 13 % weniger Primärenergieverbrauch günstiger ab.

Module A bis C

In den Modulen A bis C liegt die Bandbreite der Ergebnisse für den Gesamt-Primärenergieverbrauch bei einer Verbesserung von 14 % bis zu einer Verschlechterung um 34% gegenüber der Massivbauweise. Für den nicht erneuerbaren Primärenergieverbrauch liegt die Bandbreite zwischen minus 53 % und plus 3 %. Dabei ist anzumerken, dass sich in allen Vergleichsstudien, ausgenommen einer aufeinander aufbauenden Studienreihe (Graubner et al. (2013), Pohl (2017), Graubner et al. (2008)), der Gesamt-Primärenergieverbrauch und der nicht erneuerbare Primärenergieverbrauch für die Holzbauweise reduziert.

Ein Grund dafür, dass sich in den Studien von Pohl (2016) und Graubner et al. (2008) keine Einsparung durch die Verwendung einer Holzbauweise ergibt, liegt in den unterschiedlichen Randbedingungen, welche der Ökobilanz zu Grunde gelegt wurden. Diese können u. a. Folgende sein:

- ▶ Die Massivbauvariante enthält einen Durchschnittswert für die Umweltauswirkungen aus Massivbaustoffen, die vergleichsweise gute Ergebnisse erzielen.
- ▶ Wahl der Lebensdauer von Bauteilen in Kombination mit dem Betrachtungszeitraum

Module A bis D

In Modul D ist in allen Studien eine deutliche Verringerung des Primärenergieverbrauchs für die Holzbauweise zu erkennen. Mitunter ist in Woodard et al. (2016) und Gustavsson et al. (2006) eine solche Betrachtung enthalten. Betrachtet wurden darin die Lebenszyklusphasen A1 bis A5 (Herstellung Bauelemente und Gebäudeerrichtung), C3 bis C4 (Entsorgung und Deponierung) und D (Recyclingpotenzial der Baustoffe). Dabei ergab die Bilanzierung der Holzbauvarianten, dass die im Holz gebundene, nach der stofflichen Nutzung theoretisch noch zur Verfügung stehende Energie den Primärenergiebedarf kompensieren kann, der für die Herstellung, Errichtung und Entsorgung des Gebäudes benötigt wird (siehe Tabelle 33).

Nachfolgend ist die Analysematrix aufgeführt, die neben Eckdaten zu den untersuchten Studien auch die primärenergetischen Unterschiede zwischen den betrachteten Bauweisen enthält.

Tabelle 33: Übersicht Vergleich Primärenergieverbrauch gesamt und nicht erneuerbar

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch		Funktionelle Einheit	Betrachtete Energieform	Holz-gg-Massivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						Systemgrenze
			Holzbauweise	Massivbauweise	Holz	Massiv				A1 - A3	A4 - A5	B2 - B7	C1 - C2	C3 - C4	D	
Woodard et al. (2016)	Einfamilienhaus, Canada (Studie 2)	N/A	Holzrahmenkonstruktion	Stahlbetonkonstruktion	1.140,00	2.520,00	MJ/m ²	Pe gesamt	-55 %	x						Modul A
Woodard et al. (2016)	Einfamilienhaus, 2-stöckig, USA, Minneapolis (Studie 3)	N/A	Holzrahmenkonstruktion	Leichtbau Stahlkonstruktion	969,00	1.604,00	MJ/m ²	Pe gesamt	-40 %	x						Modul A
Woodard et al. (2016)	Außenwände Einfamilienhaus, 1-stöckig, USA, Atlanta (Studie 4)	N/A	Holzrahmenkonstruktion	Betonbauweise	580,00	810,00	MJ/m ²	Pe gesamt	-28 %	x						Modul A
Woodard et al. (2016)	Mehrfamilienhaus, Schweden (Studie 6)	N/A	Holzrahmenkonstruktion	Betonbauweise	2.840,00	3.020,00	MJ/m ²	Pe gesamt	-6 %	x	x					Modul A
Börjesson et al. (2000)	Mehrstöckiges Apartmentgebäude	100	Holzrahmenbau	Betonbau	1.100,00	1.950,00	GJ Gesamtgebäude	Pe gesamt	-44 %	x						Modul A
Graubner et al. (2008)	fiktives Einfamilienhaus	80	Holzelementbauweise	Massivbauweise (Mittel aus mehreren)	1.029.624,00	955.606,00	MJ Gesamtgebäude	Pe gesamt	8 %	x						Modul A

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz-gg-Mas-sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
				Bauweisen)												
Pajchrowski et al. (2014)	Einfamilienhaus Konventionelles Design, Polen	100	Holzrahmenkonstruktion, 150 t, (40% Beton, 45% Naturstein, 9% Holz)	Mauerwerk-AW einschalig, 218 t (49% Beton, 34% Naturstein, 2% Holz)	1,90	3,70	Pt	Pe ne	-49 %	x						Modul A
Pajchrowski et al. (2014)	Einfamilienhaus Passivhaus Design, Polen	100	Holzrahmenkonstruktion, 90 t (58% Beton, 20% Holz, 13% Glas)	Mauerwerk-AW zweischalig; 244 t (41% Beton, 42% Naturstein, 2% Holz)	4,90	5,40	Pt	Pe ne	-9 %	x						Modul A
Graubner et al. (2008)	fiktives Einfamilienhaus	80	Holzelementbauweise	Massivbauweise (Mittel aus mehreren Bauweisen)	638.200,00	733.978,00	MJ Gesamtgebäude	Pe ne	-13 %	x						Modul A
Graubner et al. (2008)	Wohngebäude, KfW-40-Haus	80	Leichtbau in Holzständer-	Mittelwert aus Beton-,	5.667.811,00	5.251.998,00	MJ Gesamtgebäude	Pe gesamt	8 %	x	x	B2 + B6	x	x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz- gg- Mas- sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
			bauweise	Leichtbau-, Porenbeton-, Kalksandstein- und Ziegelbauweise												
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Ziegel	384,00	444,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-14 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Kalksandstein	384,00	394,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-3 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Porenbeton	384,00	407,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-6 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Hybrid	384,00	397,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-3 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmassivbauweise	Ziegel	392,00	444,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-12 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz-gg-Mas-sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Kalksand-stein	392,00	394,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-1 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Porenbe-ton	392,00	407,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-4 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Hybrid	392,00	397,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-1 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
Graubner et al. (2008)	fiktives Einfami-lienhaus	80	Holzele-ment-bauweise	Massiv-bauweise (Mittel aus meh-reren Bauwei-sen)	784,00	804,00	MJ Gesamt-gebäude	Pe gesamt	-2 %	x		B2+ B4	x	x		Modul A-C
Pohl (2016)	Mehrfamilien-haus mit 12 Wohneinheiten	50	Holzstän-derbau-weise (Holz aus Deutsch-land)	Stahlbe-ton	0,97	1,00	prozentuale Abweichung	Pe gesamt	-3 %	x		B2+ B4+ B6	x	x		Modul A-C
Pohl (2016)	Mehrfamilien-haus mit 12 Wohneinheiten	50	Holzstän-derbau-weise (Holz aus	Mauer-werk-Mittel-wert aus	0,97	0,98	prozentuale Abweichung	Pe gesamt	-1 %	x		B2+ B4+ B6	x	x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz-gg-Mas-sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
			Deutsch-land)	folgenden Varianten: Leichtbe-ton-Hohlblock, Porenbe-tonstein, Kalksand-stein, Hochloch-ziegel												
Pohl (2016)	Mehrfamilienhaus mit 12 Wohneinheiten	80	Holzstän-derbau-weise (Holz aus Deutsch-land)	Stahlbe-ton	1,00	1,00	prozentuale Abweichung	Pe gesamt	0 %	x		B2+ B4+ B6	x	x		Modul A-C
Pohl (2016)	Mehrfamilienhaus mit 12 Wohneinheiten	80	Holzstän-derbau-weise (Holz aus Deutsch-land)	Mauer-werk-Mittel-wert aus folgenden Varianten: Leichtbe-ton-Hohlblock, Porenbe-tonstein, Kalksand-stein, Hochloch-ziegel	1,00	0,99	prozentuale Abweichung	Pe gesamt	1 %	x		B2+ B4+ B6	x	x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz-gg-Mas-sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
Graubner et al. (2013)	Muster-Einfamilienhaus	50	Holzständerbauweise (Holz aus Deutschland)	Ziegel-AW	2,30	2,20	kWh/(m ² NGF *a)	Pe gesamt	5 %	x		B2+ B4		x		Modul A-C
Graubner et al. (2013)	Muster-Einfamilienhaus	50	Holzständerbauweise (Holz aus Deutschland)	KS-Außenwand	2,30	2,10	kWh/(m ² NGF *a)	Pe gesamt	10 %	x		B2+ B4		x		Modul A-C
Graubner et al. (2013)	Muster-Einfamilienhaus	50	Holzständerbauweise (Holz aus Deutschland)	Porenbeton-AW	2,30	2,20	kWh/(m ² NGF *a)	Pe gesamt	5 %	x		B2+ B4		x		Modul A-C
Graubner et al. (2013)	Muster-Einfamilienhaus	50	Holzständerbauweise (Holz aus Deutschland)	Leichtbeton-AW	2,30	2,00	kWh/(m ² NGF *a)	Pe gesamt	15 %	x		B2+ B4		x		Modul A-C
Graubner et al. (2013)	Muster-Einfamilienhaus	80	Holzständerbauweise (Holz aus Deutschland)	Ziegel-AW	2,05	1,80	kWh/(m ² NGF *a)	Pe gesamt	14 %	x		B2+ B4		x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz-gg-Mas-sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
Graubner et al. (2013)	Muster-Einfamilienhaus	80	Holzständerbauweise (Holz aus Deutschland)	KS-Außenwand	2,05	1,60	kWh/(m ² NGF *a)	Pe gesamt	28 %	x		B2+B4		x		Modul A-C
Graubner et al. (2013)	Muster-Einfamilienhaus	80	Holzständerbauweise (Holz aus Deutschland)	Porenbeton-AW	2,05	1,65	kWh/(m ² NGF *a)	Pe gesamt	24 %	x		B2+B4		x		Modul A-C
Graubner et al. (2013)	Muster-Einfamilienhaus	80	Holzständerbauweise (Holz aus Deutschland)	Leichtbeton-AW	2,05	1,53	kWh/(m ² NGF *a)	Pe gesamt	34 %	x		B2+B4		x		Modul A-C
König (2015)	Mehrfamilienwohngebäude (Modernisierung I)	50	Massivholz, Holzwerkstoffe + Holztafelelemente	Mineralische Alternative	6,00	11,50	kWh/(m ² NGF *a)	Pe ne	-48 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2015)	Mehrfamilienwohngebäude (Modernisierung II)	50	Massivholz, Holzwerkstoffe + Holztafelelemente	Mineralische Alternative	23,00	27,00	kWh/(m ² NGF *a)	Pe ne	-15 %	x		B2		x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz-gg-Mas-sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
König (2015)	Mehrfamilien-wohngebäude (Neubau)	50	Holz als Primär-konstruktionsmit-tel	Minerali-sches Vergleichs-gleichs-modell	25,00	33,00	kWh/(m ² NGF *a)	Pe ne	-24 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2015)	Mehrfamilien-wohngebäude II (Modernisie-rung)	50	Massiv-holz, Holzwerk-stoffe + Holzta-felele-mente	Minerali-sche Alternati-ve	14,00	18,00	kWh/(m ² NGF *a)	Pe ne	-22 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2015)	Mehrfamilien-wohngebäude (Neubau)	50	Holz als Primär-konstruktionsmit-tel	Minerali-sches Vergleichs-gleichs-modell	13,50	29,00	kWh/(m ² NGF *a)	Pe ne	-53 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2015)	Grundschule (Modernisie-rung)	50	Massiv-holz, Holzwerk-stoffe + Holzta-felele-mente	Minerali-sche Alternati-ve	10,00	15,00	kWh/(m ² NGF *a)	Pe ne	-33 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2015)	Grundschule (Neubau)	50	Holz als Primär-konstruktionsmit-tel	Minerali-sches Vergleichs-gleichs-modell	16,80	24,80	kWh/(m ² NGF *a)	Pe ne	-32 %	x		B2		x		Modul A-C
Graubner et al. (2008)	Wohngebäude, KfW-40-Haus	80	Leichtbau in Holz-ständer-	Mittel-wert aus Beton-,	5.102.608,00	4.944.886,00	MJ Gesamt-gebäude	PE ne	3 %	x	x	B2 + B6	x	x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz- gg- Mas- sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
				Leichtbau-, Porenbeton-, Kalksandstein- und Ziegelbauweise												
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Ziegel	324,00	396,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-18 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Kalksandstein	324,00	349,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-7 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Porenbeton	324,00	361,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-10 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Hybrid	324,00	342,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-5 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmassivbauweise	Ziegel	314,00	396,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-21 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz-gg-Mas-sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Kalksand-stein	314,00	349,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-10 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Porenbe-ton	314,00	361,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-13 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Hybrid	314,00	342,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-8 %	x		B2+ B4+ B6		x		Modul A-C
Graubner et al. (2008)	fiktives Einfami-lienhaus	80	Holzele-ment-bauweise	Massiv-bauweise (Mittel aus meh-reren Bauwei-sen)	5.054.306,00	4.907.266,00	MJ Gesamt-gebäude	Pe ne	3 %	x		x	x	x		Modul A-C
Woodard et al. (2016)	Mehrfamilienhaus, Schweden (Studie 6)	N/A	Holzrah-menkon-struktion	Beton-bauweise	680,00	1.900,00	MJ/m ²	Pe gesamt	-64 %	x	x			x	x	Modul A-D
Woodard et al. (2016)	Wohngebäude, 4-stöckig, Schweden, Malmö (Studie 1)	N/A	Regional-typische Holzrah-menbau-weise inkl. Fassade	Stahlkon-struktion + Beton-Fertighau-selemente	-530,00	1.770,00	MJ/m ²	Pe gesamt	-130%	x	x			x	x	Modul A-D

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz-gg-Mas-sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
Gustavsson Leif et al. (2006)	4 stöckiges Mehrfamilienhaus	100	Holzrahmenkonstruktion	Stahlbetonkonstruktion	-1.110,00	2.600,00	GJ Gesamtgebäude	Pe gesamt	-143%	x	x			x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Ziegel	356,00	417,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-15 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Kalksandstein	356,00	364,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-2 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Porenbeton	356,00	382,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-7 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Hybrid	356,00	368,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-3 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmassivbauweise	Ziegel	374,00	417,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-10 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz-gg-Mas-sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Kalksand-stein	374,00	364,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	3 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Porenbe-ton	374,00	382,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	-2 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Hybrid	374,00	368,00	MJ/m ² NRFa	Pe gesamt	2 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2011)	Gewerbebau	50	Holz als Primär-konstruk-tionsmit-tel	Minerali-sches Vergleichs-gleichs-modell	24,00	31,00	kWh/m ² NGFa	Pe ne	-23 %	x		B2		x	x	Modul A-D
König (2011)	Bürogebäude	50	Holz als Primär-konstruk-tionsmit-tel	Minerali-sches Vergleichs-gleichs-modell	25,00	39,00	kWh/m ² NGFa	Pe ne	-36 %	x		B2		x	x	Modul A-D
König (2011)	Gemeindezent-rum	50	Holz als Primär-konstruk-tionsmit-tel	Minerali-sches Vergleichs-gleichs-modell	20,00	40,00	kWh/m ² NGFa	Pe ne	-50 %	x		B2		x	x	Modul A-D

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz-gg-Mas-sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
König (2011)	Mehrfamilienhaus	50	Holz als Primärkonstruktionsmittel	Mineralisches Vergleichsmodell	28,00	65,00	kWh/m ² NGFa	Pe ne	-57 %	x		B2		x	x	Modul A-D
König (2011)	Hochschulgebäude	50	Holz als Primärkonstruktionsmittel	Mineralisches Vergleichsmodell	14,50	28,50	kWh/m ² NGFa	Pe ne	-49 %	x		B2		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Ziegel	243,00	345,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-30 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Kalksandstein	243,00	295,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-18 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Porenbeton	243,00	311,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-22 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Hybrid	243,00	279,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-13 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Primärenergieverbrauch				Holz-gg-Mas-sivbau	Betrachtete Lebenszyklusmodule						
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Ziegel	181,00	345,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-48 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Kalksandstein	181,00	295,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-39 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Porenbeton	181,00	311,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-42 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmas-sivbau-weise	Hybrid	181,00	279,00	MJ/m ² NRFa	Pe ne	-35 %	x		B2+ B4+ B6		x	x	Modul A-D

BZR = Betrachtungszeitraum

Betrachtung der Lebenszyklusphasen

In den betrachteten Studien haben nur ein Teil der Autoren die Primärenergie auf die einzelnen Module aufgeteilt. Nachfolgend ist ein Auszug der Studien aufgeführt, die diese Aufteilung vorgenommen haben. Dabei zeigt sich, dass der Energieverbrauch in der Nutzungsphase, abhängig von den gewählten Randbedingungen der Ökobilanz, Gebäude und Systemgrenzen, in den untersuchten Ökobilanzen zwischen 48 % und 79 % des Gesamt-Primärenergiebedarfs ausmacht. An zweiter Stelle liegt die Herstellungsphase, wohingegen die Phasen A4 bis A5, C3 und C4 vergleichsweise sehr geringe Anteile aufweisen.

8.3.5 Auswertung Umweltindikator Treibhauspotenzial

Tabelle 35 mit einem Vergleich der Bauweisen bezogen auf den Indikator Treibhauspotenzial zeigt, dass sich die Holz- im Vergleich zur Massivbauweise analog zum Indikator Primärenergieverbrauch, ausgenommen in der Studienreihe (Graubner et al. 2008 und Pohl 2017), immer vorteilhaft auf den Umweltindikator Treibhauspotenzial auswirkt. In der Tabelle befinden sich 91 Gegenüberstellungen aus Ökobilanzmodellen.

Der grundlegendste Parameter, der bei einem Vergleich von Ökobilanzen zu berücksichtigen ist, ist die Systemgrenze bzw. die betrachteten Lebenszyklusphasen. In Tabelle 35 wird deutlich, dass die Bandbreite der berücksichtigten Lebenszyklusphasen in den Studien sehr hoch ist.

Daher wurden die Ökobilanzmodellvergleiche aus den Studien den drei Systemgrenzen Modul A, Modul A bis C und Modul A bis D zugeordnet und in Tabelle 34 dementsprechend sortiert. Auch hier zeigt sich eine hohe Varianz in der prozentualen Abweichung des Treibhauspotenzials beim Vergleich der Holz- mit der Massivbauweise.

Tabelle 34: Abweichung Treibhauspotenzial der Holz- gegenüber der Massivbauweise in %

Lebenszyklusphase	Treibhauspotenzial
Modul A	-103 % bis -12 %
Modul A bis C	-70 % bis +8 %
Modul A bis D	-244 % bis -17 %

Daten: Eigene Darstellung

Modul A

Wenn lediglich Modul A die Systemgrenze bildet, weist die Holzbauweise in allen Studien ein geringeres Treibhauspotenzial auf. Bei dieser Systemgrenze ist der entscheidende Aspekt für das Ergebnis, ob in der Herstellungsphase für das Holz die Eigenschaft der Kohlenstoffspeicherung angerechnet wird und die Freisetzung des Kohlenstoffs erst in Modul C wieder in Erscheinung tritt. Dadurch kann die Holzbauweise im Ergebnis für Modul A ein negatives Treibhauspotenzial verursachen und somit wesentlich besser als die Massivbauweise abschneiden. Dieser Aspekt begründet auch den „Ausreißer“ aus der Studie von Häfliger et al. (2017), worin die Holz- gegenüber der Massivbauweise 103 % weniger Treibhauspotenzial besitzt.

Üblicherweise wird die Kohlenstoffspeicherung jedoch nicht berücksichtigt, da sie in der Gesamtbilanz eine „Nullrechnung“ darstellt. Der Vorteil der Holzbauweise ist dann, beispielhaft in der Studie Hafner, Schäfer et al. (2017) mit 16 % bis 63 %, weniger deutlich ausgeprägt.

Module A bis C

Die Betrachtung der Module A bis C ist die gängigste, transparenteste und vollständigste Möglichkeit, um aktuell eine Ökobilanz nach den in Kapitel 8.1.2.2 aufgeführten Normen durchzuführen. Daher sollte diese Systemgrenze bei Aussagen über die Umweltauswirkungen von Bauweisen verwendet werden. Je nach Studie werden für die Module A bis C Einsparpotenziale von 70 % bis hin zu einer Verschlechterung der Ökobilanz um 8 % angegeben. Die größten „Ausreißer“ liegen hierbei in den Studien von Pohl (2016) und Graubner et al. (2008). Hier schneidet die Massivbauweise nahezu gleichwertig ab. Diese Abweichung von den meisten anderen Studien, die bis heute erstellt wurden, wird vor allem damit begründet, dass eine von der gängigen Literatur abweichende Lebensdauer der Holzbauteile und ein Betrachtungszeitraum von 80 Jahren angesetzt wurden.

Module A bis D

Betrachtet man zusätzlich das energetische Nutzungspotenzial von Holz nach Ende dessen Nutzungszeit als Baustoff in Modul D, ergibt sich in der Gegenüberstellung der Holz- zur Massivbauweise ein noch deutlicheres Bild zugunsten der Holzbauweise. Skullestad et al. (2016) haben bspw. die Substitution von Erdgas oder Heizöl durch das in der Holzbauvariante verwendete Holz nach Nutzungsende als Baustoff angenommen und die dadurch verhinderten CO₂-Emissionen mit in ihre Cradle-to-Gate-Bilanzierung einbezogen. Es wurden vier unterschiedliche Gebäude untersucht. Ohne die Berücksichtigung der Möglichkeit der Substitution fossiler Brennstoffe in Modul D beträgt das CO₂-Einsparungspotenzial der Holzbauvarianten gegenüber des Massivbaus 64 % bis 78 %. Erweitert man die Systemgrenze und berücksichtigt die Gutschriften durch das Recycling in Modul D, wird im Falle der Holzbauvarianten mehr CO₂ eingespart, als während der Bauteilherstellung an CO₂ verursacht wird. Im Vergleich zu den Massivbauweisen ergibt sich dadurch eine relative Verringerung von 165 % bis 244 %. Gleiches gilt auch für die Studie Gustavsson Leif et al. (2006). Wie in Kapitel 8.4.4 beschrieben, wird das Modul D nach aktueller Normung jedoch nur informativ ausgewiesen, u. a. aufgrund fehlender Datenbasis und Methodik. Für einen transparenten Vergleich von Ökobilanzen eignet sich die Systemgrenze Modul A bis D daher aktuell nicht.

Tabelle 35: Übersicht Vergleich des Treibhauspotenzials zwischen Massiv- und Holzbauweise

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial		Funktionelle Einheit	Holz- gg- Mas- sivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen							
			Holzbauweise	Massivbauweise	Holz	Massiv			A1 - A3	A4 - A5	B2 - B7	C1 - C2	C3 - C4	D	Gesamt	
Hafner, Schäfer (2017)	Einfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Holzrahmen + Mineralwolle	Lochziegel + außenseitigen Wärmedämm-Verbundsystem	140,00	380,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-63 %	x	x						Modul A
Hafner, Schäfer (2017)	Einfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Holzrahmen + Mineralwolle	Lochziegel "single-leaf"	140,00	240,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-42 %	x	x						Modul A
Hafner, Schäfer (2017)	Einfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Lochziegel "single-leaf"	160,00	240,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-33 %	x	x						Modul A
Hafner, Schäfer (2017)	Einfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Lochziegel + außenseitigen Wärmedämm-Verbundsystem	160,00	380,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-58 %	x	x						Modul A
Hafner, Schäfer (2017)	Mehrfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Porenbeton	160,00	210,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-24 %	x	x						Modul A
Hafner, Schäfer (2017)	Mehrfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Lochziegel + Dämmputz	160,00	205,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-22 %	x	x						Modul A

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial			Holz- gg- Mas- sivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen							
Hafner, Schäfer (2017)	Mehrfamili- enhaus (mit Varianten- bildung)	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Lochziegel + Mineralwolle	160,00	190,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-16 %	x	x						Modul A
Müller et al. (2015)	Minergie Mehrfamili- enhaus, 3- geschossig	-	Holzrahmen- bauweise	Konv. Bauweise mit Stahlbeton und Mauerwerk	8,00	10,00	kgCO ₂ äq/m ² *a	-20 %	x							Modul A
Häfliger et al. (2017)	Vergleich unter- schiedliche Mehrfamili- enhäuser	60	MFH03 - Holz- bauweise	MFH01 - Beton- bauweise	-0,20	6,00	kg CO ₂ /m ² a	-103%	x							Modul A
Häfliger et al. (2017)	Vergleich unter- schiedliche Mehrfamili- enhäuser	60	MFH03 - Holz- bauweise	MFH04 - Beton- bauweise	-0,20	6,00	kg CO ₂ /m ² a	-103%	x							Modul A
Woo- dard et al. (2016)	Einfamili- enhaus, Cana- da (Studie 2)	N/A	Holzrahmen- konstruktion	Stahlbetonkon- struktion	280,00	420,00	kgCO ₂ äq/m ²	-33 %	x							Modul A
Woo- dard et al. (2016)	Einfamili- enhaus, 2- stöckig, Minneapo- lis, USA	N/A	Holzrahmen- konstruktion	Leichtkaliber Stahlkonstruktion	207,00	309,00	kgCO ₂ äq/m ²	-33 %	x							Modul A
Woo- dard et al.	Außenwän- de Einfamili- enhaus, 1-	N/A	Holzrahmen- bauweise	Betonblock	100,00	170,00	kgCO ₂ äq/m ²	-41 %	x							Modul A

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial		Holz-Massivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen							
(2016)	stöckig, Atlanta, USA														
Woodard et al. (2016)	Einfamilienhaus, Deutschland	N/A	Holzrahmenbauweise	Backsteingebäude	580,00	800,00	kgCO ₂ äq/m ²	-28 %	x						Modul A
Sandanayake (2018)	Fallstudie mehrstöckiges Bürogebäude, 15-stöckig, Melbourne, Australien	N/A	Holz und Stahlbeton kombiniert	Stahlbetonkonstruktion	6.084,86	8.956,20	tCO ₂ äq	-32 %	x	A4					Modul A
Tellnes et al. (2013)	Wohngebäude mit 6 Geschossen	N/A	Holzrahmenbauweise	Stahlbetonkonstruktion	102,00	140,00	kgCO ₂ äq	-27 %	x						Modul A
Skullestad et al. (2016)	Mehrgeschossgebäude, 3 Stockwerke	N/A	Holzrahmen mit Brettschichtholz + Elemente aus Kreuzlagenholz	Scherwand Stahlbetonkonstruktion; Betonfestigkeit 30 Mpa	26,30	120,50	kgCO ₂ äq/m ²	-78 %	x						Modul A
Skullestad et al. (2016)	Mehrgeschossgebäude, 7 Stockwerke	N/A	Holzrahmen mit Brettschichtholz + Elemente aus Kreuzlagenholz	Scherwand Stahlbetonkonstruktion; Betonfestigkeit 30 Mpa	37,80	112,30	kgCO ₂ äq/m ²	-66 %	x						Modul A
Skullestad et al. (2016)	Mehrgeschossgebäude, 12 Stockwerke	N/A	Holzrahmen mit Brettschichtholz + Elemente aus Kreuzlagenholz	Scherwand Stahlbetonkonstruktion; Betonfestigkeit 30 Mpa	40,00	111,60	kgCO ₂ äq/m ²	-64 %	x						Modul A

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial			Holz- gg- Mas- sivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen							
Skul- lestad et al. (2016)	Hotelge- bäude, 21 Stockwerke, Trondheim	N/A	Decken- und Wandelemente Kreuzlagenholz , Holzrahmen und Dachstuhl mit Brett- schichtholz	Stahlbetonkon- struktion; Beton- festigkeit 45 Mpa	67,30	270,10	kgCO ₂ äq/m ²	-75 %	x							Modul A
Skul- lestad et al. (2016)	Mehrge- schossge- bäude, 3 Stockwerke	N/A	Holzrahmen mit Brettschichtholz + Elemente aus Kreuzlagenholz	Scherwand Stahl- betonkonstruktio- n; Betonfestig- keit 30 Mpa	41,60	114,70	kgCO ₂ äq/m ²	-64 %	x							Modul A
Skul- lestad et al. (2016)	Mehrge- schossge- bäude, 7 Stockwerke	N/A	Holzrahmen mit Brettschichtholz + Elemente aus Kreuzlagenholz	Scherwand Stahl- betonkonstruktio- n; Betonfestig- keit 30 Mpa	54,60	105,80	kgCO ₂ äq/m ²	-48 %	x							Modul A
Skul- lestad et al. (2016)	Mehrge- schossge- bäude, 12 Stockwerke	N/A	Holzrahmen mit Brettschichtholz + Elemente aus Kreuzlagenholz	Scherwand Stahl- betonkonstruktio- n; Betonfestig- keit 30 Mpa	59,30	105,40	kgCO ₂ äq/m ²	-44 %	x							Modul A
Skul- lestad et al. (2016)	Hotelge- bäude, 21 Stockwerke, Trondheim	N/A	Decken- und Wandelemente Kreuzlagenholz , Holzrahmen und Dachstuhl mit Brett- schichtholz	Stahlbetonkon- struktion; Beton- festigkeit 45 Mpa	94,70	261,70	kgCO ₂ äq/m ²	-64 %	x							Modul A
Graub- ner et al. (2008)	Einfamilien- haus (mit Varianten- bildung)	80	Holzelement- bauweise	Massivbauweise (Mittel aus meh- reren Bauweisen)	54.413,00	67.163,00	kg CO ₂ äq	-19 %	x	x						Modul A

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial		kgCO ₂ äq/m ² GEA	Holz-Massivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen						
Hafner, Schäfer (2017)	Einfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Holzrahmen + Mineralwolle	Lochziegel + außenseitigen Wärmedämm-Verbundsystem	145,00	400,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-64 %	x	x	B2 +B 4		x		Modul A-C
Hafner, Schäfer (2017)	Einfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Holzrahmen + Mineralwolle	Lochziegel "single-leaf"	145,00	245,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-41 %	x	x	B2 +B 4		x		Modul A-C
Hafner, Schäfer (2017)	Einfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Lochziegel "single-leaf"	165,00	245,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-33 %	x	x	B2 +B 4		x		Modul A-C
Hafner, Schäfer (2017)	Einfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Lochziegel + außenseitigen Wärmedämm-Verbundsystem	165,00	400,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-59 %	x	x	B2 +B 4		x		Modul A-C
Hafner, Schäfer (2017)	Mehrfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Porenbeton	165,00	215,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-23 %	x	x	B2 +B 4		x		Modul A-C
Hafner, Schäfer (2017)	Mehrfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Lochziegel + Dämmputz	165,00	210,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-21 %	x	x	B2 +B 4		x		Modul A-C
Hafner, Schäfer (2017)	Mehrfamilienhaus (mit Variantenbildung)	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Lochziegel + Mineralwolle	165,00	195,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-15 %	x	x	B2 +B 4		x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial			Holz- gg- Mas- sivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen						
König (2011)	Gewerbe- bau	50	Holz als Primär- konstruktions- mittel	Vergleichsmodell mit mineralischer Bauweise	6,50	10,50	kg CO ₂ äq/m ² NGF*a	-38 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2011)	Bürogebäu- de	50	Holz als Primär- konstruktions- mittel	Vergleichsmodell mit mineralischer Bauweise	6,50	13,50	kg CO ₂ äq/m ² NGF*a	-52 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2011)	Multifunktions- bau	50	Holz als Primär- konstruktions- mittel	Mineralisches Vergleichsmodell	5,10	13,00	kg CO ₂ äq/m ² NGF*a	-61 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2011)	Mehrfamili- enhaus	50	Holz als Primär- konstruktions- mittel	Mineralisches Vergleichsmodell	8,00	20,00	kg CO ₂ äq/m ² NGF*a	-60 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2011)	Hochschul- gebäude	50	Holz als Primär- konstruktions- mittel	Mineralisches Vergleichsmodell	3,00	10,00	kg CO ₂ äq/m ² NGF*a	-70 %	x		B2		x		Modul A-C
Häfliger et al. (2017)	Unter- schiedliche Mehrfamili- enhäuser	60	MFH03 - Holz- bauweise	MFH01 - Beton- bauweise	5,70	6,80	kg CO ₂ /m ² a	-16%	x		B4	C1	x		Modul A-C
Häfliger et al. (2017)	Unter- schiedliche Mehrfamili- enhäuser	60	MFH03 - Holz- bauweise	MFH04 - Beton- bauweise	5,70	6,20	kg CO ₂ /m ² a	-8 %	x		B4	C1	x		Modul A-C
Börjes- son et al. (2000)	Mehrstöcki- ges Ap- partment- gebäude Holzdepo- nierung	100	Holzrahmen- bauweise	Betonbau	38,00	59,00	tCO ₂ äq	-36 %	x	x			x	x	Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial			Holz-Massivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen						
	ohne Biogasgewinnung														
König (2015)	Mehrfamilienwohnbäude (Modernisierung I)	50	Massivholz, Holzwerkstoffe + Holztafelelemente	Mineralische Alternative	4,10	5,00	kg CO ₂ äq/m ² NGF*a	-18 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2015)	Mehrfamilienwohnbäude (Modernisierung II)	50	Massivholz, Holzwerkstoffe + Holztafelelemente	Mineralische Alternative	7,30	9,30	kg CO ₂ äq/m ² NGF*a	-22 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2015)	Mehrfamilienwohnbäude (Neubau)	50	Holz als Primärkonstruktionsmittel	Mineralisches Vergleichsmodell	7,50	11,20	kg CO ₂ äq/m ² NGF*a	-33 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2015)	Mehrfamilienwohnbäude II (Modernisierung)	50	Massivholz, Holzwerkstoffe + Holztafelelemente	Mineralische Alternative	4,00	5,10	kg CO ₂ äq/m ² NGF*a	-22 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2015)	Mehrfamilienwohnbäude (Neubau)	50	Holz als Primärkonstruktionsmittel	Mineralisches Vergleichsmodell	4,20	9,30	kg CO ₂ äq/m ² NGF*a	-55 %	x		B2		x		Modul A-C
König (2015)	Grundschule (Modernisierung)	50	Massivholz, Holzwerkstoffe + Holztafelelemente	Mineralische Alternative	2,10	4,00	kg CO ₂ äq/m ² NGF*a	-48%	x		B2		x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial			Holz-Massivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen						
			mente												
König (2015)	Grundschule (Neubau)	50	Holz als Primärkonstruktionsmittel	Mineralisches Vergleichsmodell	2,50	7,00	kg CO ₂ äq/m ² NGF*a	-64 %	x		B2		x		Modul A-C
Gerilla et al. (2007)	Typisches regionales Wohngebäude, Saga, Japan	35	Holzrahmenkonstruktion	Stahlbetonkonstruktion	2.100,00	2.500,00	kgCO ₂ äq / Jahr	-16 %	x	x	B2 - B4	x	x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel (mit Variantenbildung)	50	Holzrahmenbauweise	Ziegel	22,00	28,00	kg CO ₂ /m ² NRFa	-21 %	x		B2 +B 4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel (mit Variantenbildung)	50	Holzrahmenbauweise	Kalksandstein	22,00	26,00	kg CO ₂ /m ² NRFa	-15 %	x		B2 +B 4+ B6		x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwert-	50	Holzrahmenbauweise	Porenbeton	22,00	28,30	kg CO ₂ /m ² NRFa	-22 %	x		B2 +B 4+ B6		x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial			Holz- gg- Mas- sivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen					
König (2017)	kessel (mit Varianten- bildung) Einfamilien- haus ohne Keller mit Gas- Brennwert- kessel (mit Varianten- bildung)	50	Holzrahmen- bauweise	Hybrid	22,00	24,50	kg CO2/m ² NRFa	-10 %	x		B2 +B 4+ B6	x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilien- haus ohne Keller mit Gas- Brennwert- kessel (mit Varianten- bildung)	50	Holzmassiv- bauweise	Ziegel	21,50	28,00	kg CO2/m ² NRFa	-23 %	x		B2 +B 4+ B6	x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilien- haus ohne Keller mit Gas- Brennwert- kessel (mit Varianten- bildung)	50	Holzmassiv- bauweise	Kalksandstein	21,50	26,00	kg CO2/m ² NRFa	-17 %	x		B2 +B 4+ B6	x		Modul A-C
König (2017)	Einfamilien- haus ohne Keller mit Gas-	50	Holzmassiv- bauweise	Porenbeton	21,50	28,30	kg CO2/m ² NRFa	-24 %	x		B2 +B 4+ B6	x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial			Holz- gg- Mas- sivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen						
	Brennwert- kessel (mit Varianten- bildung)														
König (2017)	Einfamilien- haus ohne Keller mit Gas- Brennwert- kessel (mit Varianten- bildung)	50	Holzmassiv- bauweise	Hybrid	21,50	24,50	kg CO2/m² NRFa	-12 %	x		B2 +B 4+ B6		x		Modul A-C
Graub- ner et al. (2008)	fiktives Einfamilien- haus	80	Holzelement- bauweise	Massivbauweise (Mittel aus meh- reren Bauweisen)	401935	372935	kg CO2äq	8 %	x		B2 +B 4+ B6	x	x		Modul A-C
Pohl (2016)	Muster- MFH	50	Holzständer- bauweise (Holz aus Dland)	Stahlbeton	0,88	1,00	prozentuale Abweichung	-12 %	x		B2 +B 4+ B6	x	x		Modul A-C
Pohl (2016)	Muster- MFH	50	Holzständer- bauweise (Holz aus Dland)	Mauerwerk- Mittelwert aus folgenden Vari- anten: Leichtbeton- Hohlblock, Po- renbetonstein, Kalksandstein, Hochlochziegel	0,88	0,94	prozentuale Abweichung	-6 %	x		B2 +B 4+ B6	x	x		Modul A-C
Pohl (2016)	Muster- MFH	50	Holzständer- bauweise (Holz aus Dland)	Stahlbeton	0,97	1,00	prozentuale Abweichung	-3 %	x		B2 +B 4+	x	x		Modul A-C

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial			Holz- gg- Mas- sivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen						
											B6				
Pohl (2016)	Muster-MFH	50	Holzständerbauweise (Holz aus Dland)	Mauerwerk-Mittelwert aus folgenden Varianten: Leichtbeton-Hohlblock, Porenbetonstein, Kalksandstein, Hochlochziegel	0,97	0,97	prozentuale Abweichung	0 %	x		B2 +B 4+ B6	x	x		Modul A-C
Graubner et al. (2013)	Muster-EFH	50	Holzständerbauweise (Holz aus Deutschland)	Ziegel-AW	1,98	4,00	kg CO2/m² NRFa	-51 %	x		B2 +B 4		x		Modul A-C
Graubner et al. (2013)	Muster-EFH	50	Holzständerbauweise (Holz aus Deutschland)	KS-Außenwand	1,98	4,00	kg CO2/m² NRFa	-51 %	x		B2 +B 4		x		Modul A-C
Graubner et al. (2013)	Muster-EFH	50	Holzständerbauweise (Holz aus Deutschland)	Porenbeton-AW	1,98	4,50	kg CO2/m² NRFa	-56 %	x		B2 +B 4		x		Modul A-C
Graubner et al. (2013)	Muster-EFH	50	Holzständerbauweise (Holz aus Deutschland)	Leichtbeton-AW	1,98	3,70	kg CO2/m² NRFa	-46 %	x		B2 +B 4		x		Modul A-C
Häfliger et al. (2017)	Unterschiedliche Mehrfamilienhäuser	60	MFH03 - Holzbauweise	MFH01 - Betonbauweise	2,10	6,20	kg CO2/m²a	-66 %	x		B4	C1	x	x	Modul A-D

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial			Holz-Massivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen						
Häfliger et al. (2017)	Unterschiedliche Mehrfamilienhäuser	60	MFH03 - Holzbauweise	MFH04 - Betonbauweise	2,10	6,00	kg CO ₂ /m ² a	-65 %	x		B4	C1	x	x	Modul A-D
Woodard et al. (2016)	Wohngebäude, 4-stöckig, Malmö, Schweden (Studie 1)	N/A	Typische Holzrahmenbauweise mit Fassade aus Holz	Stahlkonstruktion und Fertighauselemente aus Beton	30,00	400,00	kgCO ₂ äq/m ²	-93 %	x					x	Modul A-D
Börjesson et al. (2000)	Mehrstöckiges Apartmentgebäude (ohne Betonkarbonisation)	100	Holzrahmenbauweise	Betonbau	2,00	59,00	tCO ₂ äq	-97 %	x	x		x	x	x	Modul A-D
Börjesson et al. (2000)	Mehrstöckiges Apartmentgebäude (mit Betonkarbonisation)	100	Holzrahmenbauweise	Betonbau	2,00	18,00	tCO ₂ äq	-89 %	x	x		x	x	x	Modul A-D
Börjesson et al. (2000)	Mehrstöckiges Apartmentgebäude Holzdeponierung mit Biogasgewinnung	100	Holzrahmenbauweise	Betonbau	4,00	59,00	tCO ₂ äq	-93 %	x	x		C1 - C2	x	x	Modul A-D

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial			Holz- gg- Mas- sivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen						
									x					x	
Skul- lestad et al. (2016)	Mehrge- schossge- bäude, 3 Stockwerke	N/A	Holzrahmen mit Brettschichtholz + Elemente aus Kreuzlagenholz	Scherwand Stahl- betonkonstruktio- n; Betonfestig- keit 30 Mpa	-140,30	127,90	kgCO ₂ äq/m ²	-210%	x					x	Modul A-D
Skul- lestad et al. (2016)	Mehrge- schossge- bäude, 7 Stockwerke	N/A	Holzrahmen mit Brettschichtholz + Elemente aus Kreuzlagenholz	Scherwand Stahl- betonkonstruktio- n; Betonfestig- keit 30 Mpa	-144,70	117,00	kgCO ₂ äq/m ²	-224%	x					x	Modul A-D
Skul- lestad et al. (2016)	Mehrge- schossge- bäude, 12 Stockwerke	N/A	Holzrahmen mit Brettschichtholz + Elemente aus Kreuzlagenholz	Scherwand Stahl- betonkonstruktio- n; Betonfestig- keit 30 Mpa	-169,10	117,30	kgCO ₂ äq/m ²	-244%	x					x	Modul A-D
Skul- lestad et al. (2016)	Hotelge- bäude, 21 Stockwerke, Trondheim	N/A	Decken- und Wandelemente Kreuzlagenholz , Holzrahmen und Dachstuhl mit Brett- schichtholz	Stahlbetonkon- struktion; Beton- festigkeit 45 Mpa	-230,80	355,20	kgCO ₂ äq/m ²	-165%	x					x	Modul A-D
Gus- tavsson Leif et al. (2006)	4 stöckiges Wohnge- bäude	100	Holzrahmen- konstruktion	Stahlbetonkon- struktion	-44,20	-16,50	tCO ₂	-168%	x	x	B3 - B4	x	x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilien- haus ohne Keller mit Gas- Brennwert- kessel	50	Holzrahmen- bauweise	Ziegel	17,20	25,00	kg CO ₂ /m ² NRFa	-31 %	x		B2 +B 4+ B6		x	x	Modul A-D

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial			Holz- g- Mas- sivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen						
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Kalksandstein	17,20	23,00	kg CO2/m² NRFa	-25 %	x		B2 +B 4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Porenbeton	17,20	25,20	kg CO2/m² NRFa	-32 %	x		B2 +B 4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzrahmenbauweise	Hybrid	17,20	20,70	kg CO2/m² NRFa	-17 %	x		B2 +B 4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmassivbauweise	Ziegel	14,00	25,00	kg CO2/m² NRFa	-44 %	x		B2 +B 4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmassivbauweise	Kalksandstein	14,00	23,00	kg CO2/m² NRFa	-39 %	x		B2 +B 4+ B6		x	x	Modul A-D

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial			Holz- gg- Mas- sivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen						
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmassivbauweise	Porenbeton	14,00	25,20	kg CO2/m² NRFa	-44 %	x		B2 +B 4+ B6		x	x	Modul A-D
König (2017)	Einfamilienhaus ohne Keller mit Gas-Brennwertkessel	50	Holzmassivbauweise	Hybrid	14,00	20,70	kg CO2/m² NRFa	-32 %	x		B2 +B 4+ B1 4		x	x	Modul A-D
Hafner, Schäfer (2017)	Einfamilienhaus	50	Holzrahmen + Mineralwolle	Lochziegel + außenseitigen Wärmedämm-Verbundsystem	90,00	350,00	kgCO2äq/m² GEA	-74 %	x	x	B2 +B 4		x	x	Modul A-D
Hafner, Schäfer (2017)	Einfamilienhaus	50	Holzrahmen + Mineralwolle	Lochziegel "single-leaf"	90,00	220,00	kgCO2äq/m² GEA	-59 %	x	x	B2 +B 4		x	x	Modul A-D
Hafner, Schäfer (2017)	Einfamilienhaus	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Lochziegel "single-leaf"	30,00	220,00	kgCO2äq/m² GEA	-86 %	x	x	B2 +B 4		x	x	Modul A-D
Hafner, Schäfer (2017)	Einfamilienhaus	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Lochziegel + außenseitigen Wärmedämm-Verbundsystem	30,00	350,00	kgCO2äq/m² GEA	-91 %	x	x	B2 +B 4		x	x	Modul A-D
Hafner, Schäfer (2017)	Mehrfamilienhaus	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Porenbeton	65,00	200,00	kgCO2äq/m² GEA	-68 %	x	x	B2 +B 4		x	x	Modul A-D

Studie	Objekt	BZR	Bauweise		Treibhauspotenzial		kgCO ₂ äq/m ² GEA	Holz-Massivbau	Betrachtete Lebenszyklusphasen						
									x	x	B2+B4		x	x	
Hafner, Schäfer (2017)	Mehrfamilienhaus	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Lochziegel + Dämmputz	65,00	200,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-68 %	x	x	B2+B4		x	x	Modul A-D
Hafner, Schäfer (2017)	Mehrfamilienhaus	50	Kreuzlagenholz + Mineralwolle	Lochziegel + Mineralwolle	65,00	170,00	kgCO ₂ äq/m ² GEA	-62 %	x	x	B2+B4		x	x	Modul A-D

BZR = Betrachtungszeitraum

Betrachtung der Lebenszyklusphasen

Die detaillierte Ausweisung der Anteile der einzelnen Module des Lebenszyklus erfolgt in den Studien auch für den Umweltindikator Treibhauspotenzial lediglich stellenweise und auf unterschiedliche Weise. Daher kann auf Basis der Daten nicht für alle Quellen aus Tabelle 35 eine Zuweisung durchgeführt werden. In Tabelle 36 ist die prozentuale Verteilung des Treibhauspotenzials bei der Betrachtung der Systemgrenze Module A bis C für die Quellen dargestellt, bei denen diese Zuordnung möglich war. Die letzte Spalte enthält jeweils eine Auflistung, welche Einzelmodule für diesen Zeitraum in den Studien verwendet wurden. Grundsätzlich ist zu unterscheiden, ob das Modul B6 (Energieverbrauch in der Nutzungsphase) betrachtet wurde, da es einen Großteil der Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus verursacht. Der Anteil reicht von 45 % bis 80 %. Maßgeblicher Faktor für diesen Anteil ist der Energiestandard des Gebäudes und der Energieträger für die Energieversorgung: Je niedriger der Energieverbrauch des Gebäudes ist, desto höher ist der Anteil der Herstellungsphase des Gebäudes. In Kapitel 8.4.7 wird diesbezüglich eine in den Studien vorgenommene Sensitivitätsanalyse beschrieben.

Betrachtet man den Anteil der Herstellungs- gegenüber der Entsorgungsphase, zeigt sich die Auswirkung der unterschiedlichen Bilanzierungsweisen des Baustoffs Holz. Holz unterscheidet sich insofern von anderen Baustoffen, als dass es nachwächst, Kohlenstoff speichert und einen nutzbaren Energiegehalt besitzt, was in Ökobilanzen Berücksichtigung finden muss.

Holz besteht zu ungefähr 50 % aus Kohlenstoff. Daraus resultiert eine der Atmosphäre entzogene Menge von 1,83 kg CO₂ pro kg Holz. Wird diese Menge bei der Herstellung einbezogen, muss sie, um die In- und Outputströme ausgeglichen zu halten, in der Entsorgungsphase auch wieder als Emission ausgewiesen werden. Ein Vorteil ist dabei der temporäre Entzug des CO₂. Unter Betrachtung des kompletten Lebenszyklus und damit auch des Ersatzes von Materialien (B4) sind sämtliche Kohlenstoffspeicher in der Entsorgungsphase C wieder zu leeren (besonders schnell bei Verbrennung). Zusätzlich wird bei der Verbrennung von Holz in Müllverbrennungsanlagen oder Heizkraftwerken Energie bereitgestellt, welche fossile Energieträger ersetzen kann. Dies kann unter Berücksichtigung von unterschiedlichen Verbrennungswirkungsgraden zu "negativen" CO₂-Emissionen in Phase D führen. Dieser Aspekt wird in Kapitel 8.4.4 aufgegriffen.

Nach der aktuellen Normung aus Kapitel 8.1.2.2 geht die Kohlenstoffspeicherung nicht mit einem negativen Wert in das Modul A ein, da die Entleerung des Kohlenstoffspeichers aus Modul C bereits in Modul A berücksichtigt wird. Diese Vorgehensweise wird u. a. in Hafner, Schäfer (2017) verwendet. Der wesentliche Anteil der Umweltauswirkung liegt in dieser Studie in der Herstellung (Zuweisung der verwendeten Normen zu den Quellen befindet sich im Anhang A.2). Häfliger et al. (2017) berücksichtigt die Kohlenstoffspeicherung in Modul A und die Entleerung in Modul C. Deshalb macht die Herstellungsphase in dieser Quelle einen sehr geringen Anteil aus. In der Studie Graubner et al. (2013) schneidet die Holzbauweise in der Herstellungsphase (Module A1 bis A3) gegenüber der Massivbauweise 19 % günstiger ab. Bei Betrachtung der Module A bis C inkl. des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase schneidet sie im Vergleich 8 % schlechter ab. Die Grundvoraussetzung des identischen Energieverbrauchs der zu vergleichenden Varianten wird dabei jedoch nicht eingehalten.

Tabelle 36: Anteile der Module A bis C für den Umweltindikator Treibhauspotenzial

Quelle	Gebäudetyp	Bauweise	Herstellung	Bauphase	Nutzungsphase		Rückbau	Berücksichtigte Phasen in der Studie
			A1-A3	A4-A5	B1-B5	B6-B7	C1-4	
Hafner et al. (2017)	Einfamilienhaus A	Holzrahmen	91%		8%		1%	A1-A3,B2-B4,C3-C4
	Einfamilienhaus B	Mauerwerk (perforated brick + ETICS)	76%		20%		3%	A1-A3,B2-B4,C3-C4
	Einfamilienhaus C	Holzbauweise Cross laminated timber (CLT)	90%		6%		3%	A1-A3,B2-B4,C3-C4
	Einfamilienhaus D	Mauerwerk (perforated brick, single leaf)	96%		4%		0%	A1-A3,B2-B4,C3-C4
	Mehrfamilienhaus A	CLT-Holzbauweise	93%		6%		1%	A1-A3,B2-B4,C3-C4
	Mehrfamilienhaus B	Beton	95%		2%		3%	A1-A3,B2-B4,C3-C4
Gerilla et al. (2007)	Wohnhaus A	Holzbauweise	11%		8%	80%	1%	Konstruktion, Wartung, Nutzung, Entsorgung
	Wohnhaus B	Massivbau	14%		8%	77%	1%	Konstruktion, Wartung, Nutzung, Entsorgung
Aschenbach, Rüter (2016)	Einfamilienhaus A	Holztafelbauweise	85%	15%				A1,A2,A3,A4,A5
	Einfamilienhaus B	Holzskelettbauweise	86%	14%				A1,A2,A3,A4,A5
Loewe (2010)	Einfamilienhaus	Massivbau	62%		8%		31%	Herstellung, Nutzung, End-of-Life
König (2017)	Einfamilienhaus A	Holzrahmenbauweise	41% (inkl. Rückbau)			59%		A1-A3, B2, B4, B6, C3-C4
	Einfamilienhaus B	Ziegel	55% (inkl. Rückbau)			45%		A1-A3, B2, B4, B6, C3-C4
	Einfamilienhaus C	Kalksandstein	52% (inkl. Rückbau)			48%		A1-A3, B2, B4, B6, C3-C4
	Einfamilienhaus D	Porenbeton	54% (inkl. Rückbau)			46%		A1-A3, B2, B4, B6, C3-C4
	Einfamilienhaus E	Hybrid	49% (inkl. Rückbau)			51%		A1-A3, B2, B4, B6, C3-C4
	Einfamilienhaus F	Massivholz	41% (inkl. Rückbau)			59%		A1-A3, B2, B4, B6, C3-C4
Graubner (2013)	Einfamilienhaus A	Ziegel	13%		3%	80%	5%	A1-A3, B2, B4, C3-C4
	Einfamilienhaus B	Kalksandstein	13%		3%	80%	5%	A1-A3, B2, B4, B6, C3-C4
	Einfamilienhaus C	Porenbeton	15%		4%	78%	4%	A1-A3, B2, B4, B6, C3-C4
	Einfamilienhaus D	Leichtbeton	12%		3%	82%	3%	A1-A3, B2, B4, B6, C3-C4
	Einfamilienhaus E	Holzständer	0%		1%	88%	11%	A1-A3, B2, B4, B6, C3-C4
Häfliger (22)	Mehrfamilienhaus A	Betonbauweise	47%			53%		A1-A3, B4, C1-C3
	Mehrfamilienhaus B	Holzbauweise	8%			92%		A1-A3, B4, C1-C3
	Mehrfamilienhaus C	Betonbauweise	45%			55%		A1-A3, B4, C1-C3

Quelle: Eigene Darstellung

8.3.6 Innenraumluftqualität bei Holz- und Massivbau

Emissionen von Bauteilen in den Innenraum sind nicht Bestandteil der betrachteten vergleichenden Ökobilanzen. Gleiches gilt für die Fragestellung, ob eine Bauweise mit erhöhten Emissionen in den Innenraum auch eines erhöhten Energiebedarfs infolge einer erhöhten notwendigen Lüftungsrate bedarf. Im Folgenden soll dennoch die Auswirkung der Bauweise auf die Innenraumluftqualität beleuchtet werden. Hierbei werden schwerpunktmäßig Holzbaustoffe betrachtet.

Inhaltsstoffe von wesentlicher Bedeutung sind VOCs (leichtflüchtige organische Substanzen, engl. volatile organic compounds), VVOCs (sehr leichtflüchtige organische Substanzen, engl. very volatile organic compounds) und Formaldehyd. Diese Substanzen können entweder direkt von angrenzenden Oberflächen emittiert werden oder auch durch Innenraumbekleidungen aus darunterliegenden Konstruktionen in den Innenraum diffundieren.

Der Baustoff Holz enthält sowohl natürliche als auch, ggf. durch zusätzliche Verklebung, synthetische Inhaltsstoffe, welche flüchtig sein und in die Raumluft gelangen können. Infolgedessen wird die Zusammensetzung der Innenraumluft positiv oder negativ beeinflusst. In Hafner, Rüter (2017) wurde untersucht, welchen Einfluss Bauen mit Holz auf den Klimaschutz auf nationaler Ebene haben kann. Dabei wurden einige Herausforderungen eines verstärkten Einsatzes von Holz im Bausektor ausgemacht. Eine davon stellt die fehlende Differenzierung zwischen natürlichen, bis zu einem bestimmten Grad möglicherweise gesundheitsfördernden und synthetischen Emissionen aus Holzprodukten dar. Erhöhte Formaldehydkonzentrationen und die Toxizität bestimmter flüchtiger organischer Verbindungen liegen dabei im Fokus, wobei vor allem Holzwerkstoffplatten in Diskussion stehen. Der Einfluss der Schichttiefe innerhalb eines Bauteils wird nicht bestimmt, und auch die starke Inhomogenität innerhalb einer und zwischen verschiedenen Baumarten wird nicht einbezogen. Als Ursache der fehlenden Differenzierung und Bewertung der Auswirkungen von natürlichen und synthetischen Emissionen aus Holzprodukten lässt sich insbesondere die unzureichende Forschung benennen. Verschärfungen in der EnEV tragen dazu bei, dass Gebäude immer luftdichter werden und Emissionen aus raumbildenden Bauteilen bei falschem Lüftungsverhalten an Relevanz zunehmen.

Die Studie schlägt vor, die gesundheitliche Interaktion von Holz, Mensch und Raum ganzheitlich zu analysieren. Damit kann möglichen negativen Aspekten einer Holzverwendung im Innenraum mit einer potenziellen Verbesserung von baubiologischen und bauphysikalischen Eigenschaften begegnet werden. Sollten positive Erkenntnisse im Bereich der Wohnqualität und Gesundheit aufgrund des Einsatzes von Holz erlangt werden, könnte das zu einer gesteigerten Nachfrage nach Holzprodukten führen.¹²⁸

In Bodemer et al. (2017) wurden gesundheitliche Auswirkungen von Holz und Holzwerkstoffen auf den Menschen untersucht. Danach besteht aktuell noch Aufklärungsbedarf hinsichtlich der Bewertung und Klassifizierung von Emissionen aus Holz und Holzwerkstoffen, da die Frage nach der gesundheitlichen Interaktion der Emissionen auf den Menschen noch nicht hinreichend geklärt ist. Ferner zeigen bislang durchgeführte Studien, dass Holz im Innenraum keine negativen Auswirkungen auf den Menschen und dessen Gesundheit hat. Mentale und körperliche Tests zeigten sogar, dass Räume mit Holz positiver bewertet wurden als Referenzräume mit anderen Materialien. Eigenschaften wie behagliche, warme, angenehme und gute Raumluftqualität wurden dem Material Holz und seiner Oberfläche zugeordnet. Für eine weitreichendere Glaubwürdigkeit dieser Ergebnisse sind jedoch Verbundstudien der verschiedenen Aspekte notwendig. Aktuell wird oftmals kritisiert, dass die Forschung nur einzelne Aspekte untersucht, die Aus-

¹²⁸ Vgl. Hafner, Rüter (2017)

gangslage und Materialangaben sehr differenziert waren oder kein repräsentativer Querschnitt durch die Probanden dargestellt wurde.

Ferner enthält die Arbeit von Bodemer et al. (2017) Anmerkungen zu baurechtlichen Anforderungen an Gebäude und Bauprodukte hinsichtlich des Gesundheitsschutzes. Beispielsweise wird für Formaldehyd in Bezug auf Holzwerkstoffe in der deutschen Chemikalien-Verordnung (CLP) angegeben, dass eine einzuhaltende Ausgleichskonzentration von 0,124 mg/m³ vorgeschrieben ist. Im Jahr 2016 wurde Formaldehyd als wahrscheinlich karzinogen beim Menschen eingestuft. Innerhalb der REACH-Verordnung wird der Industrie vorgeschrieben, dass Informationen über gefährliche Stoffe in Produkten offen dargelegt werden sollen. Eine für Nutzer verständliche Aufbereitung dieser Informationen wird damit jedoch nicht zwingend sichergestellt. Für VOCs im Allgemeinen veröffentlichte eine Expertengruppe der europäischen Kommission insgesamt 29 pränormative Reports, welche eine rechtliche Basis für die Bewertung von Bauprodukten in Bezug zur Innenraumluftqualität bilden. Insgesamt enthalten baurechtliche Anforderungen auf europäischer bzw. nationaler Ebene keine konkreten Angaben zur Gewährleistung des Gesundheitsschutzes für Gebäude und Bauprodukte.¹²⁹

Zusammenfassend legt die Studie Bodemer et al. (2017) dar, dass nationale Regelungen und Leitfäden der Mitgliedsstaaten gelten, bis ein europäisches Bewertungssystem in Form von Emissionsklassen erarbeitet wird. Allerdings merkt sie an, dass eine Klassifizierung den Einsatz von Holzbauprodukten im Innenraum infolge der hohen Zusammensetzung an VOC-Emissionen erschweren könnte. Experten geben an, dass VOC-Emissionen aus Holz und Holzbauprodukten hinsichtlich ihrer Qualität und Quantität nicht nach gesundheitlicher Wertigkeit klassifiziert werden können.

Müller et al. (2015) vergleicht den Holz- und Massivbau miteinander und untersucht dabei die Indikatoren Formaldehydemissionen aus Baustoffen, Lösemittlemissionen aus Baustoffen und Raumlufthygiene. Als Resultat der Studie bezüglich Formaldehydemissionen im Holzbau lässt sich anführen, dass Holzwerkstoffe früher häufige Formaldehydquellen waren und teilweise auch noch heute sind. In der Vergangenheit wurden diese Werkstoffe oftmals mit formaldehydbasierten Klebstoffen verleimt. Hingegen werden heutzutage nur noch formaldehydarme oder -freie Holzwerkstoffe eingesetzt. Damit können die Formaldehydraumluftkonzentrationen relativ niedrig gehalten werden und liegen unter dem gesundheitsschädigenden Grenzwert von 0,1 ppm. Beim Massivbau sind typische Formaldehydquellen insbesondere Textilien, Bindemittel in Mineralfaserdämmungen, gelochte Akustikdecken aus Kunststoff und verschiedene Kleber. Aufgrund sehr dichter Gebäudehüllen können in modernen Gebäuden aber immer noch sehr hohe Formaldehydkonzentrationen auftreten. Ein passendes Lüftungskonzept muss bei der Errichtung angewendet werden, um belastete Raumluft ab- und Frischluft zuzuführen.

Lösemittlemissionen aus Baustoffen sind in der Holzbauweise z. B. natürliche, flüchtige Bestandteile wie Terpene aus Bast- und Rindenanteilen von OSB-Platten oder VOCs aus Naturharzen. Beim Massivbau emittieren hingegen vorwiegend Bodenbeläge oder Weichmacher von Kunststofftextilien flüchtige, organische Stoffe, die die Raumluft belasten. Für eine möglichst VOC-arme Raumluftkonzentration ist eine hohe Luftwechselrate anzustreben. Zudem ist auf VOC-Freiheit bei den einzusetzenden Baustoffen und Materialien zu achten.

Bezüglich des Themas Raumlufthygiene zieht die Studie Müller et al. (2015) das Fazit, dass für eine hygienische und gesunde Raumluft im Holzbau keine chemischen Holzschutzmittel und biozide Beschichtungsstoffe in beheizten Innenräumen eingesetzt werden sollten. Weitere negative Einflussfaktoren stellen das Rauchen im Gebäude oder gelochte Akustikdecken dar. Bei

¹²⁹ Vgl. Bodemer et al. (2017)

Letzteren gelangen Fasern aus der dahinterliegenden Mineralfaserdämmung in den Wohnraum. Positiv auf die Raumluft wirken sich eine Lüftungsanlage und fugenarme Beläge aus, da Fugen ein potenzieller Schmutzablagerungsort sind. Im Massivbau sind keine chemischen Holzschutzmittel vorhanden. Kunststoffhaltige Putze und Farbanstriche können jedoch die Raumlufthygiene beeinflussen. In der Oberflächenmaterialisierung besitzt der Massivbau dadurch unter Umständen einen Vorteil.¹³⁰

8.4 Analyse von einzelnen Einflussgrößen

8.4.1 Einfluss unterschiedlicher Konstruktionsweisen

8.4.1.1 Betrachtungsschwerpunkte

Bei der Wahl der Bauweise spielt eine Vielzahl von Aspekten eine Rolle, da jede Bauweise bauphysikalische, wirtschaftliche und bautechnische Vor- und Nachteile mit sich bringt. Hinzu kommen weiche Faktoren wie das Image und das Wohngefühl. Beispielsweise kann eine Massivbauweise das Gefühl von Schutz, Stabilität und Dauerhaftigkeit, und Holzgebäude ein angenehmes Wohnklima erzeugen.¹³¹

Die Auswertung der vergleichenden Ökobilanzen konzentriert sich ausschließlich auf den Vergleich der Umweltauswirkungen. Weitere Faktoren wie beispielsweise eine Sensitivitätsanalyse für die Unterschiede in der thermischen Behaglichkeit oder die Eignung von Holz zur Nachverdichtung von Ballungsräumen (Aufstockung bzw. Anbau durch leichte Bauweise) sind nicht Bestandteil dieser Untersuchung.¹³²

Innerhalb der Literaturrecherche ist aufgefallen, dass sich die Autoren im Rahmen der Erstellung von vergleichenden Ökobilanzen überwiegend auf Wohngebäude beschränken. Nach Abbildung 36 aus diesem Bericht zeigt sich jedoch, dass der Anteil fertiggestellter Gebäude in Holzbauweise im Jahr 2017 im Nichtwohnungsbau (17,3 %) vergleichbar mit dem Anteil bei EFH (18,8 %) ist. Zwischen 2002 und 2017 ist der Fertigstellungsanteil bei den EFH um 5,8 % gestiegen und bei den NWG um 3,2 %. Dies verdeutlicht den weiteren Bedarf bzw. das Potenzial an Ökobilanzstudien mit speziellem Schwerpunkt auf weiteren Gebäudenutzungstypen.

Nach Graubner et al. (2008) betrug der Anteil des Gebäudebestands in Massivbauweise (Stahlbeton und Mauerwerksbau) in Deutschland (Stand 2006) 89 %, der Anteil der Holzbauweise lediglich 10 %. In einer aktuellen Studie von Pohl (Stand 2017) liegt der Anteil des Holzbaus im gesamten Wohnungsbau bei ca. 11 %. Nach dem DHWR¹³³ (Stand 2016) liegt der bundesweite Anteil der Holzbauweise über alle Nutzungstypen bei 16,1 %.

In Abbildung 36 wird dargestellt, dass der Anteil fertiggestellter Wohnhäuser in Holzbauweise im Jahr 2017 für EFH 18,8 % und für MFH nur 2,7 % betrug. Dieser Unterschied begründet, dass die überwiegende Anzahl der betrachteten Studien EFH als Schwerpunkt setzt.

In Krötsch (2018) wird ergänzend darauf hingewiesen, dass der Anteil der Holzbauweise seit zwei Jahrzehnten kontinuierlich wächst.

¹³⁰ Vgl. Müller et al. (2015)

¹³¹ Vgl. Graubner et al. (2008)

¹³² Vgl. <http://www.proholzbw.de/aktuelles/2018/detail/news/detail/News/holzbau-soll-baden-wuerttembergs-staedte-erobern/> (Zugriffsdatum 01.09.2018)

¹³³ Vgl. DHWR Deutscher Holzwirtschaftsrat: Roadmap Holzwirtschaft 2025, Berlin, 2016

8.4.1.2 Vergleich unterschiedlicher Konstruktionsweisen je Bauweise

Anhand der Auswertung des Umweltindikators Treibhauspotenzial wird nachfolgend die Auswirkung der Konstruktionsweise bzw. der Baustoffe beleuchtet.

In vergleichenden Ökobilanzen können grundsätzlich drei unterschiedliche Verfahren beobachtet werden, um die Umweltauswirkungen zu vergleichen:

- ▶ Für die Massiv- und Holzbauweise wird jeweils lediglich eine Konstruktionsweise gewählt (z. B. Stahlbeton- und Holzmassivbauweise).
- ▶ Für die Massiv- und Holzbauweise wird jeweils ein Mittelwert aus verschiedenen Konstruktionsweisen gebildet (z. B. Mittelwert aus Ziegel, Kalksandstein und Beton für die Massivbauweise).
- ▶ Die Bauweisen werden jeweils einzeln ausgewiesen und im Bericht einzeln analysiert.

Bei den ersten beiden Varianten ist anzumerken, dass der Baustoff bzw. die Konstruktionsweise selbst einen hohen Einfluss auf das Ergebnis und den Vergleich der beiden Bauweisen haben kann. Daher sind die Umweltauswirkungen immer im direkten Zusammenhang mit dem gewählten Baustoff bzw. der Konstruktionsweise zu betrachten.

Anteil Masse des Holzes innerhalb der Holzbauweise

In der Studie von König et al. (2011) zeigt sich bei der Betrachtung eines Wohngebäudes mit einem möglichst hohen Anteil an Holzbauteilen (Wände, Decken, Dachkonstruktion und weitere Bauteile wie Fenster, Türen, Wand- und Deckenbekleidungen), dass der Anteil nicht regenerierbarer Baustoffe bezogen auf die Masse stark überwiegt. Nachwachsende Baustoffe bilden nur einen Anteil von bis zu 18 % der verwendeten Massen. Den wesentlichen Teil dieser nicht erneuerbaren Baustoffe bilden aufgrund ihres hohen Gewichts Bodenplatte, Fundamentierung, Aufzugsschächte und Treppenhäuser aus Stahlbeton. Da die untersuchten Gebäude nur zwei- bis dreigeschossig sind, fällt die Bodenplatte, die etwa so viel wiegt wie zwei Holzdecken mit Bodenaufbau, besonders ins Gewicht. Weniger relevant ist die technische Gebäudeausrüstung wie Sanitär-, Heizungs-, Lüftungs- und Elektroinstallationen, die sich ebenfalls kaum durch biogene Baustoffe ersetzen lässt. Ein ähnliches Ergebnis zeigt auch der Massenvergleich in der Studie von König et al. (2011), in der der Holzanteil der untersuchten Gebäude in Holzbauweise weniger als 10 % ausmacht.¹³⁴

Holzbauweisen

In Hafner, Schäfer (2017) werden für ein EFH und unter Anwendung der in Kapitel 8.1.2.2 genannten Normenreihe zur Berechnung der Ökobilanz die Holzrahmen- und die Kreuzlagenbauweise, jeweils mit Mineralwolldämmung, einer Massivbauweise gegenübergestellt. Im Ergebnis verursachen die Holzrahmenbauweise 41 % und die Bauweise in Kreuzlagenholz 33 % weniger Treibhauspotenzial im Vergleich zur Massivbauweise. Somit schneidet die Holzrahmenbauweise bei der Betrachtung der Module A bis C im Vergleich 8 % günstiger ab.

In König (2017) wird ein EFH für sechs unterschiedliche Bauweisen modelliert. Bei der Betrachtung der Module A bis C unter Einhaltung der EnEV mit den verschärften Anforderungen zum 01.01.2016 und mit einem Gas-Brennwärmtank zur Heizwärmeversorgung zeigt sich, dass die Holzrahmenbauweise im Vergleich zur Ziegelbauweise 21 % weniger Treibhauspotenzial besitzt und die Holzmassivbauweise 23 %. Somit ist die Holzmassivbauweise im direkten Vergleich lediglich 2 % besser (siehe Tabelle 35).

¹³⁴ Vgl. König et al. (2011)

Ziel des Projekts von Achenbach, Rüter et al. (2016) war die Erarbeitung repräsentativer Ökobilanzdatensätze für durchschnittliche Fertighäuser in Holztafel- und Holzskelettbauweise inklusive ihrer Wand-, Dach- und Deckenelemente. Die Ökobilanz umfasst alle Lebenszyklusphasen von der Rohstoffgewinnung bis zum errichteten Haus (Module A1 bis A3).

Im Wohnungsbau lag der Anteil der Fertigteilbauweise in den Jahren von 2008 bis 2012 zwischen 13 % und 14 %. Der größte Anteil hiervon wurde in Fertigbauelementen in Holzbauweise gefertigt. Im gesamten Holzbaubereich werden vorrangig Häuser mit einer Wohneinheit errichtet.

Während die Bauteile im „klassischen“ Holz- und im Massivbau aus den einzelnen Baustoffen auf der Baustelle gefertigt werden, findet im Holzfertigbau die Montage ganzer Bauteilflächen bereits im Werk des Hausherstellers statt (Modul A1 statt A3). Durch den hohen Vorfertigungsgrad fallen die Aufwendungen zur Errichtung des Gebäudes auf der Baustelle dementsprechend geringer aus (Modul A5). Die entsprechende Datenbasis, u. a. durch von der Industrie bereitgestellten EPD für die Herstellungsphase (Module A1 bis A3), ist bereits verfügbar.¹³⁵

Die Studie enthält Ergebnisse für die Module A1 bis A5. Es werden sowohl einzelne Bauelemente (Außenwände, Innenwände, Decken und Dachelemente) in Holzfertigbauweise als auch ganze Gebäude betrachtet. Innerhalb der Ökobilanz für das Gesamtgebäude zeigt sich, dass die Holztafelbauweise 66 % weniger nicht erneuerbare Primärenergie und ein 30 % geringeres Treibhauspotenzial verursacht als die Holzskelettbauweise.

Bei der Betrachtung einzelner Lebenszyklusphasen zeigt sich, dass die Halbwarenbereitstellung (Modul A1) die Umweltwirkungen je nach Wirkungskategorie mit 52 % bis 100 % bestimmt. In der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial besitzen die Bauelemente in Holztafelbauweise innerhalb des Moduls A1 (betrachtete Holzkonstruktion bestehend aus Außenwänden, Innenwänden, Decken und Dachelementen) mit 52 % den geringsten Anteil, die Bauelemente in Holzskelettbauweise hingegen ca. 40 % bis 82 %. In der Auswertung des gesamten Gebäudes wurde für das Gebäude in Holztafelbauweise ein Anteil von 68 % und für das Gebäude in Holzskelettbauweise 75 % ermittelt. Bei der Untersuchung von Modul A2 fällt auf, dass der Transport zum Werk mit 0 % bis 2 % in allen Produktkategorien nur untergeordnet bei der Betrachtung des Treibhauspotenzials ins Gewicht fällt. Für das Modul A3 wurden dagegen erhöhte Anteile festgestellt. So nimmt die Herstellung der Bauelemente in Holztafelbauweise einen Anteil von 19 % bis 27 % und die Herstellung in Holzskelettbauweise 8 % bis 26 % ein. Im Gegensatz zu den Transporten zu den Hausherstellern haben die Transporte zur Baustelle (Modul A4) hohe Anteile am Treibhauspotenzial. Den niedrigeren Anteil weist hier das Gebäude in Holztafelbauweise mit 9 % auf. Modul A5 fällt mit maximal 6 % für Gebäude in Holztafelbauweise nur untergeordnet ins Gewicht.¹³⁶

Die betrachteten Studien zeigen, dass sich innerhalb der Holzbauweise, abhängig von der Konstruktion, große Unterschiede in den Umweltauswirkungen ergeben können.

Beim Vergleich von Hafner, Schäfer (2017) und König (2017) zeigt sich, dass die Wahl der Konstruktionsweise innerhalb der Holzbauweise, abgesehen von der Fertigbauweise, einen Unterschied von weniger als 10 % an dem Treibhauspotenzial ausmacht. Für eine abschließende Aussage fehlt in den vorliegenden Studien jedoch die Datenbasis. Eine Studie für die Holzfertigbauweise zeigt z. B. erhebliche Unterschiede zwischen der Holzskelett- und der Holztafelbauweise.

¹³⁵ Vgl. <http://bau-umwelt.de/hp1/Startseite.htm>

¹³⁶ Vgl. Achenbach, Rüter (2016)

Massivbauweisen

Für ein mehrgeschossiges EFH in Kreuzlagenholzbauweise mit Mineralwolle wurden in Hafner, Schäfer (2017) drei Massivbauweisen (Porenbeton, Lochziegel mit Dämmputz, Lochziegel mit Mineralwolle) mit den gleichen Randbedingungen gegenübergestellt. Die Unterschiede der Massivbauweisen sind bei der Betrachtung des Treibhauspotenzials geringfügig. Die Holzbauweise erzielt zwischen 15 %, bezogen auf Lochziegel mit Mineralwolle, und 23 %, bezogen auf Porenbeton, bessere Ergebnisse.

Beim Vergleich der Holz- mit den unterschiedlichen Massivbauweisen ergeben sich in König (2017) deutliche Unterschiede. Die Holzrahmenbauweise erreicht in den Modulen A bis C ein 21 % geringeres Treibhauspotenzial gegenüber der Porenbetonbauweise und ein 10 % geringeres gegenüber der Hybridbauweise (Kalksandsteinbauweise 15 %, Ziegelbauweise 21 %).

In Pohl (2016) wurde die Holzständerbauweise in einer Variantenbildung für ein MFH mit der Stahlbetonbauweise und einem Mittelwert aus verschiedenen Mauerwerksbaustoffen (Leichtbetonhohlblock, Porenbetonstein, Kalksandstein, Hochlochziegel) verglichen. Bei Betrachtung der Module A bis C ist das Ergebnis, dass die Holzrahmenbauweise im Indikator Treibhauspotenzial 12 % günstiger als die Stahlbetonvariante und 6 % günstiger als der Durchschnitt mehrerer Mauerwerksbauweisen abschneidet. (siehe Tabelle 35)

In Graubner (2013) wird für ein MFH eine Variantenbetrachtung durchgeführt, bei der der Holzständerbauweise fünf Mauerwerksbaustoffe gegenübergestellt werden. Der Unterschied im Treibhauspotenzial, für die Module A bis C, liegt bei maximal 10 %. Gegenüber der Porenbetonbauweise liegt die Holzskelettbauweise um 56 % niedriger, für die Kalksandstein- und Ziegelbauweise sind es gleichermaßen 51 % weniger und für die Leichtbetonvariante 46 % weniger.

Für unterschiedliche Baustoffe innerhalb der Massivbauweise zeigt sich im Vergleich zu den Holzbauweisen ein homogeneres Bild. Die Wahl des mineralischen Baustoffes hat einen maximalen Einfluss von ca. 10 % auf das Treibhauspotenzial, wobei Mauerwerksbaustoffe grundsätzlich besser abschneiden als die Betonbauweise.

Vergleich Recycling-Beton gegenüber herkömmlichem Beton

Die Studie von Bischof et al. (2010) untersuchte die ökologischen Vor- und Nachteile von Recycling-Beton gegenüber herkömmlichem Beton. Als Ergebnis zeigt die Studie, dass ein Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnung insbesondere den Landverbrauch für Kiesabbau und Deponierung von Abbruchmaterial reduziert. Ursache für den geringeren Landverbrauch liegt in der Schonung des Deponieraumes. Auch in der Studie Gugerli et al.¹³⁷ werden die Vorteile von Recycling-Beton vorrangig in den Bereichen Ressourcenverbrauch, Landschaftsschonung und Reduzierung der Deponien gesehen.¹³⁸

Im Hinblick auf weitere Umweltbelastungen sind die Einflüsse der Verbrennung fossiler Energieträger und die Zementherstellung von entscheidender Bedeutung, vor allem ersichtlich in der Wirkungskategorie Treibhauspotenzial. Die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnung hat hierbei nur einen geringen Anteil.¹³⁹

Bezüglich Transport wird in Bischof et al. (2010) festgestellt, dass, wenn bei einem Einsatz von Gesteinskörnung mehr als 30 km LKW-Transportdistanzen anfallen, der Transport zu mindestens doppelt so hohen Belastungen in den Umweltindikatoren „Energieressourcen“, „Treibhaus-

¹³⁷ Gesund und ökologisch bauen, Gugerli/Lenel/Sintzel Verlag faktor 2015; www.nachhaltiges-bauen.de, Forum Nachhaltiges Bauen

¹³⁸ Vgl. Bischof et al. (2010)

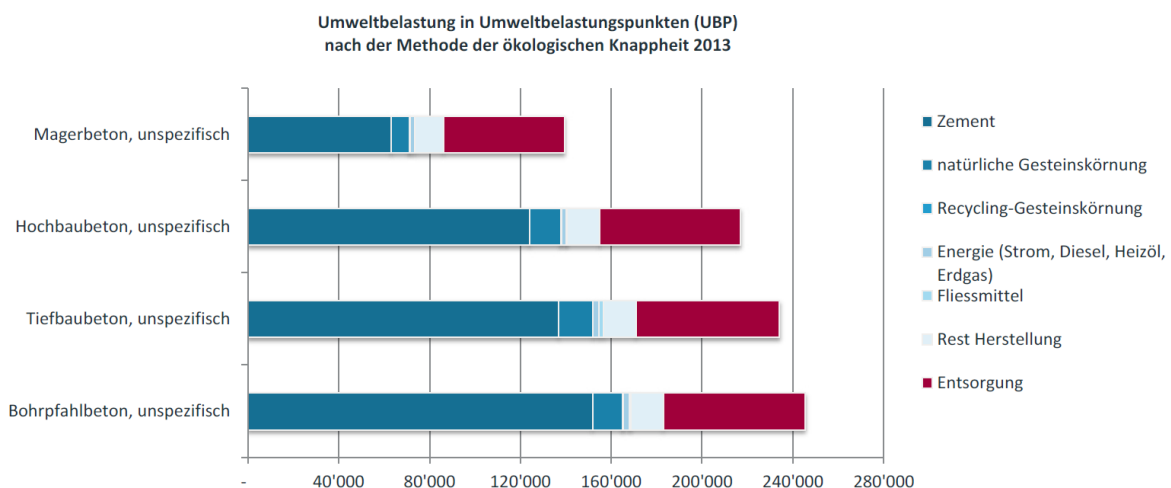
¹³⁹ Gesund und ökologisch bauen, Gugerli/Lenel/Sintzel Verlag faktor 2015; www.nachhaltiges-bauen.de, Forum Nachhaltiges Bauen

effekt“, „Versauerung“ und „Atemwegserkrankungen“ wie für die Produktion der natürlichen bzw. RC-Gesteinskörnung führt.¹⁴⁰

Mit der Zielsetzung den Primärenergiebedarf und die Treibhausgasemissionen zu senken, gab die Stadt Zürich eine Studie an Tschümperlin, Frischknecht (2016) in Auftrag, in der die Ökobilanz ausgewählter Betonsorten verglichen werden sollte. Ziel der Arbeit war die Darstellung von Umweltkennwerten zur Herstellung von verschiedenen Zuschlagstoffen, Zementsorten und darauf basierenden unspezifischen Betonsorten. Entscheidend für vorliegende Studie ist die Untersuchung von Betongranulat (rezyklierte Gesteinskörnung aus aufbereitetem Betonabbruch) und Mischgranulat (Gemisch aus mineralischen Bauabfällen).¹⁴¹

In der nachfolgenden Abbildung werden unterschiedliche Betonsorten nach dem Indikator Umweltbelastungspunkte bewertet. Die Ermittlung der Umweltbelastungspunkte erfolgt, indem die Mengen der emittierten Schadstoffe bzw. der benötigten Ressourcen mit Ökofaktoren multipliziert werden. Die Ökofaktoren werden für die verschiedenen Einwirkungen entsprechend ihrer Schädlichkeit bestimmt. Je höher der Ökofaktor ist, desto umweltbelastender ist die entsprechende Einwirkung. Die Einheit der Ökofaktoren ist UBP pro Einheit der Umwelteinwirkung. Also z. B. UBP / g emittierte Substanz, UBP / MJ energetische Ressource oder UBP / m² Landnutzung.¹⁴²

Abbildung 55: Umweltbelastung (in UBP) pro m³ unspezifische Betonsorte



Quelle: Tschümperlin, L., Frischknecht, R. (2016): Ökobilanz ausgewählter Betonsorten – Schlussbericht, S. 24.

Anhand der Abbildung 55 wird deutlich, dass Zement 73 % bis 83 % der Gesamtumweltbelastung der Herstellung verursacht, wobei die Gesteinskörnung nur einen Anteil von 7 % bis 10 % an der Gesamtumweltbelastung der Herstellung hat. Im Vergleich der Gesteinskörnung ergibt sich, dass die Recycling-Gesteinskörnung nur wenige Prozent einnimmt und daher besser dasteht als die natürliche Gesteinskörnung.

¹⁴⁰ Vgl. Bischof et al. (2010)

¹⁴¹ Vgl. Tschümperlin, Frischknecht (2016)

¹⁴² Vgl. Bundesamt für Umwelt BAFU, Schweizerische Eidgenossenschaft, Die Methode der Umweltbelastungspunkte, Mai 2008

Tabelle 37: Übersicht über die Umweltauswirkungen der natürlichen Gesteinskörnung und der Recycling-Gesteinskörnung

	Bezug	Primär- energie gesamt	Primär- energie nicht erneuerbar	Primär- energie erneuerbar	Treib- hausgas- emissionen	Treibhaus- gas- emissionen pro Primärener- gie nicht erneuerbar
		Herstellung	Herstellung	Herstellung	Herstellung	Herstellung
		MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	MJ Öl-eq	kg CO ₂ -eq	kg CO ₂ -eq / MJ Öl-eq
Natürliche Gesteins- körnung	kg	0,059	0,054	0,005	0,002	0,044
Beton- granulat	kg	0,041	0,037	0,004	0,001	0,032
Misch- granulat	kg	0,002	0,002	0	0	0,222

Daten: Tschümperlin, L., Frischknecht (2016): Ökobilanz ausgewählter Betonsorten – Schlussbericht, S.32.

Tabelle 37 verdeutlicht die Vorteile von Mischgranulat und Betongranulat gegenüber der natürlichen Gesteinskörnung. Über die Umweltauswirkungen Gesamt-Primärenergie, nicht erneuerbare Primärenergie, erneuerbare Primärenergie und Treibhausgasemissionen weisen die beiden Recycling-Gesteinskörnungen geringere Werte auf als die natürliche Gesteinskörnung. In der Kategorie Umweltbelastung schneidet das Mischgranulat mit 0,437 Umweltbelastungspunkten am besten ab, an zweiter Stelle das Betongranulat mit 2,12 und die natürliche Gesteinskörnung dahinter mit 35,5. Lediglich in der Umweltauswirkung Treibhausgasemissionen pro nicht erneuerbarer Primärenergie steht die natürliche Gesteinskörnung mit 0,044 kg CO₂-eq/MJ Öl-eq besser da.

Die Studie empfiehlt den Einsatz von Recycling-Gesteinskörnungen aus Misch- und Betonabbruch bei den bilanzierten Betonarten (Mager-, Hochbau-, Tiefbau-, Bohrpfahlbeton). Insbesondere die Verwendung im einfachen Hochbau sollte gefördert werden. Anzumerken ist dabei, dass sich Recycling-Beton aufgrund seiner Eigenschaften nicht für alle Anwendungsbereiche gleichermaßen eignet.

8.4.2 Transportdistanz

Im Nachfolgenden werden verschiedene Studien angeführt, welche auf den Lebenszyklusabschnitt Transport innerhalb vergleichender Ökobilanzen eingehen.

In der Studie von Achenbach, Rüter (2016) des Thünen-Instituts werden die Umweltauswirkungen der Produktions- und Konstruktionsphase von durchschnittlichen Fertighäusern in Holztafel- und Holzskelettbauweise sowie von in Deutschland produzierten Bauelementen untersucht, um Ökobilanzdaten entsprechend den aktuellen Europäischen Normen (DIN EN ISO 14044, Konformität mit DIN EN 15804 und DIN EN 15978) zu erhalten. Die Ergebnisse basieren auf einer Primärdatenerhebung aus dem Jahr 2009, bei der in 14 Werken der deutschen Holzfertigindustrie die jeweiligen Jahresproduktionen betrachtet wurden. Dabei wurde die gesamte Herstellungs- und Errichtungsphase inklusive der dazugehörigen Vorketten (Module A1 bis A5) be-

trachtet, wobei die Nutzungs- und Entsorgungsphase des Produkts nicht berücksichtigt wurden.¹⁴³

Für die Prüfung des Einflusses des Transports stehen die Modul A2 und A4 im Fokus, konkret Transporte zu Hausherstellern und zur Baustelle. Einen Überblick über die Distanzen der Halbwaren zu den Hausherstellern, Modul A2, bietet die nachfolgende Tabelle 38.

Tabelle 38: Durchschnittliche Distanzen der Halbwarentransporte zu den Hausherstellern

Bauelemente/-stoffe	km
Materialien zur Herstellung der Wand-, Dach- und Deckenelemente	
Schnittholz	63
Brettschichtholz	144
Konstruktionsvollholz	182
Balkenschichtholz	40
Hobelware	138
Furniersperrholz/-schichtholz	104
Massivholzplatten	150
Spanplatten	310
MDF	42
OSB	67
Gipskartonplatte	289
Gipsfaserplatte	272
Faserzementplatte	98
Polystyrol	285
Mineralwolle	299
Holzfaserdämmplatte	62
Sonstige	300*
weitere Baustoffe/-elemente (Türen, Fenster, etc.)	300*
* angenommene Transportdistanz, die nicht auf die Primärdatenerhebung zurückgeht.	

Daten: Achenbach H., Rüter S. (2016), S. 37.

In Tabelle 38 wird ersichtlich, dass die Anzahl der zurückgelegten Kilometer zwischen 40 km (Balkenschichtholz) und 310 km (Spanplatten) variiert. Für den durchschnittlichen Transport der Konstruktionshölzer, Plattenwerkstoffe und Dämmmaterialien zu den Hausherstellern wurde eine Distanz von 220 km ermittelt.¹⁴⁴

¹⁴³ Vgl. Achenbach, Rüter (2016)

¹⁴⁴ Vgl. Achenbach, Rüter (2016)

Im weiteren Verlauf der Wertschöpfungskette werden die fertigen Bauprodukte von den Hausherstellern zu den Baustellen transportiert (Modul A4). Die nachfolgende Tabelle 39 stellt diese Distanzen prozentual dar. Hierbei ist ersichtlich, dass 89 % des Transports in Deutschland und 10 % innerhalb Europas sowie 1 % in den außereuropäischen Raum erfolgen. Der Export von weiterverarbeitetem Holz aus Deutschland nach Übersee ist daher vernachlässigbar.

Tabelle 39: Transportdistanzen zwischen den Hausherstellern und den Baustellen

Transportdistanz	Anteil [%]
Deutschland	89
< 50 km	8
> 50 km und < 200 km	19
> 200 km und < 400 km	41
> 400 km	21
Europa	ca. 10
Sonstige	ca. 1

Daten: Achenbach, Rüter (2016), S. 38.

Betrachtet man die Herkunft der Holzbaustoffe, so ähneln die Werte des Exports denen des Imports. Insgesamt werden 92 % des eingesetzten Vollholzes in Deutschland hergestellt und weitere 8 % aus dem europäischen Raum bezogen, siehe Tabelle 40. Bei den Holzwerkstoffen fällt der Anteil etwas geringer aus, hier werden 77 % in Deutschland und 23 % in Europa produziert. Lediglich Schnittholz, Spanplatten und Massivholzplatten werden in höherem Maße aus anderen europäischen Ländern importiert. Insgesamt gilt, dass keine holzbasierten Bauprodukte aus dem außereuropäischen Raum importiert, respektive verwendet, werden.¹⁴⁵

Tabelle 40: Herkunft der Holzbaustoffe

Baustoff	Deutschland [%]	Europa [%]
Vollholz	92	8
Schnittholz	51	49
Konstruktionsvollholz	99	1
Balkenschichtholz	100	0
Brettschichtholz	97	3
Holzwerkstoffe	77	23
Massivholzplatte	69	31
OSB	90	10
Spanplatte	70	30
zementg. Spanplatte	100	0
MDF	100	0

¹⁴⁵ Vgl. Achenbach, Rüter (2016)

Baustoff	Deutschland [%]	Europa [%]
Holzbaasierte Dämmstoffe	84	16

Daten: Achenbach, Rüter (2016), S. 38.

Zur Beantwortung der Frage, wie hoch der Anteil des Transportes an den Umweltauswirkungen im Vergleich zum gesamten Lebenszyklus ist, werden hier beispielhaft die Indikatoren GWP (Treibhauspotenzial), Acid Potential (Versauerungspotenzial von Boden und Wasser) und ADPE (Potenzial für den abiotischen Abbau nicht fossiler Ressourcen) angegeben. Die nachstehende Tabelle 41 gibt einen Überblick über die prozentualen Anteile der Module an den gesamten Umweltwirkungen.

Tabelle 41: Anteile der einzelnen Module an den gesamten Umweltwirkungen (Module A1 bis A5)

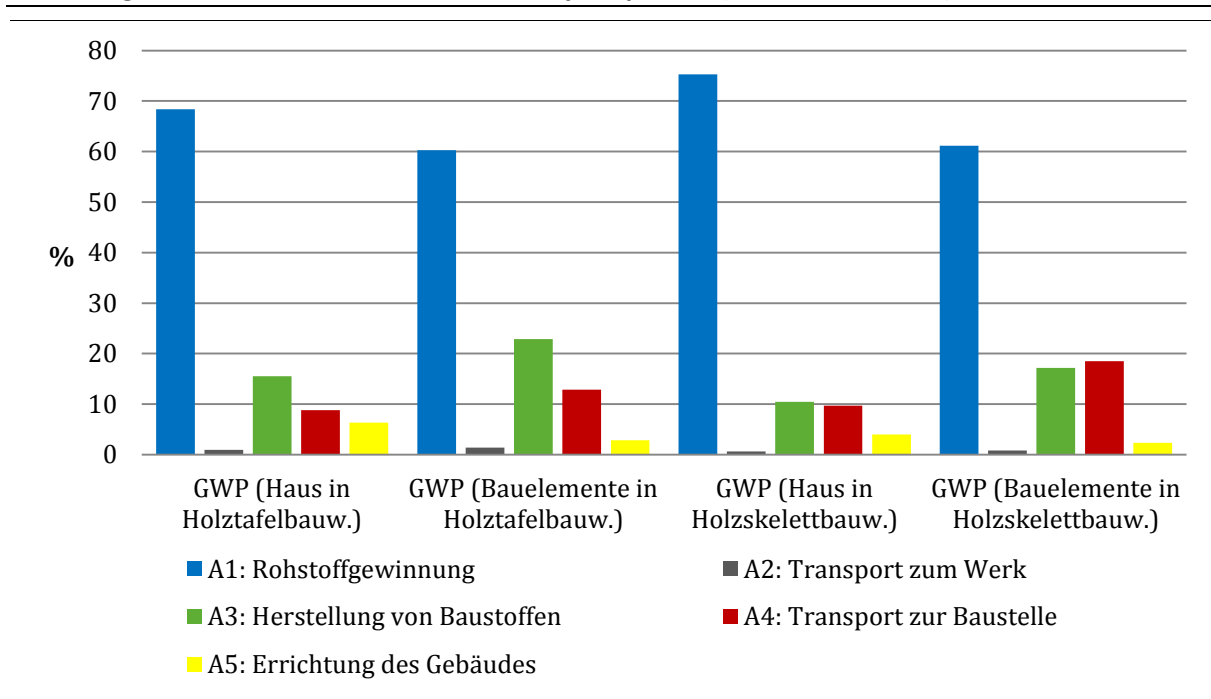
Modul	Wirkungskategorie	Gebäude in Holztafelbauweise	Bauelemente in Holztafelbauweise	Gebäude in Holzskelettbauweise	Bauelemente in Holzskelettbauweise
A1: Rohstoffgewinnung	GWP, fossil [%]	68	52-68	75	40-82
	AP [%]	68	53-67	78	42-85
	ADPE [%]	99	99-100	99	99
A2: Transport zum Werk	GWP, fossil [%]	1	1-2	1	0-1
	AP [%]	1	1-3	1	1
	ADPE [%]	0	0	0	0
A3: Herstellung von Baustoffen	GWP, fossil [%]	16	19-27	10	8-26
	AP [%]	14	16-28	8	5-20
	ADPE [%]	0	0-1	1	0-1
A4: Transport zur Baustelle	GWP, fossil [%]	9	9-17	10	8-29
	AP [%]	13	13-21	11	8-34
	ADPE [%]	0	0-0	0	0
A5: Errichtung des Gebäudes	GWP, fossil [%]	6	2-4	4	1-4
	AP [%]	4	2-3	2	1-2
	ADPE [%]	0	0	0	0

Daten: Achenbach, Rüter (2016), S. 94.

Mit 0 % bis 2 % fällt im Indikator Treibhauspotenzial der Einfluss des Transports zu den Werken (Modul 2) innerhalb der Gesamtbetrachtung untergeordnet ins Gewicht. Hingegen hat der Anteil des Transportes der Bauteile zu den Baustellen (Modul A4) bei einem GWP von 8 % bis 29 % einen beträchtlichen Anteil an den Gesamtwirkungen. Es wird ersichtlich, dass sich die GWP-Werte von Holztafel- und Holzskelettbauweise in Modul A2 und Modul A4 stark ähneln. Die Holztafelbauweise steht jedoch im Modul A4 sowohl beim gesamten Gebäudevergleich mit lediglich 9 % GWP als auch einer geringeren Werte-Spannweite bei den einzelnen Bauelementen

mit 9 % bis 17 % etwas besser da.¹⁴⁶ Zuzüglich sind die Ergebnisse des GWP in der Abbildung 56 veranschaulicht.

Abbildung 56: Anteile der einzelnen Lebenszyklusphasen (Module A1 bis A5) am GWP



Daten: Achenbach, Rüter (2016), S. 95.

Die Studie von Kellenberger, Althaus (2008) analysiert die Ökobilanzen verschiedener Komponenten von Gebäuden in der Schweiz. Hierbei soll insbesondere die Bedeutung oftmals vernachlässigter Materialien und Prozesse aufgezeigt und zu berücksichtigende Stellschrauben ermittelt werden. Einen dieser untersuchten Prozesse stellt der Transport von Gebäudematerialien vom Werk zur Baustelle dar und wird von der verwendeten Software (LTE-OGIP) umfasst. Die hierbei angenommenen Transportdistanzen basieren auf der Studie von Binz et al. (2000). Ähnlich wie in der vorangegangenen Studie werden in einer Tabelle die Transportwege differenter Baumaterialien von der Produktion zur Baustelle aufgezeigt. Als Beispiele sollen an dieser Stelle die Werte von massiven Baustoffen sowie Holz aufgezeigt werden. Bei Beton beträgt die Distanz 32 km, bei Ziegel 76 km und in den Holzkategorien wird sie bei Schnittholz mit 48 km, bei Brettchichtholz mit 83 km sowie bei Faserplatte (weich) mit bis zu 131 km angegeben.¹⁴⁷ Aus diesem Vergleich wird ersichtlich, dass die Wege bei Holzprodukten grundsätzlich von höheren Distanzen geprägt sind. Im Vergleich zur ersten vorgestellten Studie mit den Distanzen der Bauprodukte zu den Baustellen in Deutschland (41 % > 400 km) fallen die Distanzen innerhalb der Schweiz um einiges geringer aus.

Aus der Studie lässt sich folgern, dass der Einfluss des Transportes bei drei Gebäudekomponenten (Betondach und Kalksandsteinbauteile) einen nicht unwesentlichen Faktor für die Ökobilanzierung spielen und dieser Indikator daher nicht unberücksichtigt bleiben sollte. Der Transport fällt stark ins Gewicht trotz eher geringen Distanzen, weil sich das Betondach aus schweren Materialien (Beton, Stahl und Kiesel) zusammensetzt. In der Kategorie „nicht-erneuerbarer kumulativer Energiebedarf (Fossil und Nuklear)“ beträgt der Anteil Transport ca. 5 % und die Materialien selbst ca. 78 % am Gesamtenergiebedarf des Betondaches über eine Lebenszeit von 80

¹⁴⁶ Vgl. Achenbach, Rüter (2016)

¹⁴⁷ Vgl. Kellenberger, Althaus (2008)

Jahren. Bei den Bauteilen Doppelwand und Kalksandsteinwand sieht es ähnlich aus: Die schweren Kalksteinblöcke und eine Distanz von 75 km vom Werk zur Baustelle erhöhen den Anteil des Transports am Energiebedarf. Hierbei beträgt der Anteil des Transports ca. 10 % sowie 12 % am Energiebedarf.¹⁴⁸

Eine dritte Studie von Gustavsson, Sathre (2006) unterstreicht den Einfluss des Materialtransports auf die Energie- und CO₂-Bilanz sowohl bei Holzrahmen- als auch bei Betonbauten. Die Analyse basiert auf einem viergeschossigen Wohngebäude, welches 16 Appartements und eine Nutzfläche von 1.190 m² besitzt. Die Berechnungen setzen sich aus dem Materialbedarf zusammen, um funktional identische Versionen des Gebäudes zu modellieren, einmal mittels Holzrahmen- und einmal mittels Stahlbetonbauweise. Als Grundlage für die Untersuchung des Transporteinflusses dienen Referenzkilometer mit LKW (Zement: 50 bis 250 km, Beton 50 km, Rundhölzer 45 km, Holzprodukte 200 bis 350 km sowie weitere Materialien), welche in einem Vergleich erhöht wurden, um den Einfluss von längeren Transportdistanzen auf die Energie- und CO₂-Bilanz zu ermitteln. Die LKW-Transportdistanz von ausgewählten Materialien wurde als Vergleich um 200 km erhöht, sodass die Auswirkungen auf Primärenergieverbrauch sowie CO₂-Bilanz beobachtet werden können. Hierbei wurde z. B. die Distanz von Zement, Rundhölzern, Holzprodukten sowie Stahl erhöht, allerdings Beton ausgenommen. Der Studie lag die Annahme zugrunde, dass der Energiebedarf bei 1.5 MJ Öl/t km für den LKW-Transport liegt. Der Primärenergieverbrauch bildet die Summe aus der Energie, die zur Gewinnung (bspw. Abholzung), zur Verarbeitung und zum Transport der Materialien benötigt wird, abzüglich der unteren Heizwerte des Anteils der Fertigprodukte und Prozessnebenprodukte, welche wiedergewonnen und zur Verfügung gestellt werden können. Ferner wurde aus der Summe des eingesetzten fossilen Brennstoffs der Primärenergieverbrauch für den eingesetzten Strom in der Materialproduktion und des Sägerestholzes für die Holzverarbeitung berechnet. Die CO₂-Bilanz setzt sich folgendermaßen zusammen: Emissionen in die Atmosphäre aus der fossilen Brennstoffverbrennung und industriellen Prozessreaktionen abzüglich der vermiedenen CO₂-Emissionen durch den Austausch von fossilem Brennstoff durch Biotreibstoff und abzüglich wachsendem Kohlenstoffspeicher in Baumaterialien und Wäldern.¹⁴⁹

Im Ergebnis zeigt sich für den Parameter Materialtransport, dass dieser die Energie- und CO₂-Bilanz sowohl beim Holz- als auch beim Betonrahmenbau wesentlich beeinflusst. In beiden Fällen wird für den Transport der Rohmaterialien (Rundhölzer, Mineralstoffe etc.) zu den Verarbeitungsfabriken sowie der Fertigprodukte zur Baustelle fossile Energie benötigt. Die genauen Werte der Studie sind abhängig von der Annahme der Transportdistanzen für die diversen Materialien. Es wird deutlich, dass lokale Materialproduktionen bzw. Quellen eine Reduktion des Energieverbrauchs sowie der CO₂-Emissionen bewirken.¹⁵⁰ Folgende Werte lassen sich beim Parameter Transport bei Erhöhung der Transportdistanz um 200 km für die Produkte Holz und Zement der Studie entnehmen:

Steigerung des Primärenergieverbrauchs um + 340 GJ (Transportbilanz erhöht sich von -1110 GJ auf -770 GJ) beim Holzrahmenbau und Steigerung im Zementbau um + 620 GJ (Transportbilanz von 260 GJ auf 880 GJ). Für die CO₂-Bilanz gilt, dass diese bei der Holzbauweise um + 7.5 Tonnen C steigt (neuer Anteil für Transport: -36.7 Tonnen C an der Gesamt-CO₂-Bilanz von -44.2 Tonnen C) und bei der Massivbauweise um + 13.7 Tonnen C (neuer Anteil für Transport: -2,8 Tonnen C an der Gesamt-CO₂-Bilanz von -16.5 Tonnen C).¹⁵¹

¹⁴⁸ Vgl. Kellenberger, Althaus (2008)

¹⁴⁹ Vgl. Gustavsson, Sathre (2005)

¹⁵⁰ Vgl. Gustavsson, Sathre (2005)

¹⁵¹ Vgl. Gustavsson, Sathre(2005)

Die Schlussfolgerung der vierten Studie von Sandanayake et al. (2018) ist, dass der Einsatz von Holz u. a. die Transportemissionen während der Errichtung eines Gebäudes reduzieren kann. Für die Analyse wurde als Systemgrenze der Ansatz Cradle-to-Gate festgelegt. Zudem wird die Bauphase einbezogen, da die Emissionen während dieser in Ökobilanzen oftmals nicht betrachtet werden. Teil der Methodik ist eine Fallstudienanalyse. So werden ein Betongebäude in Melbourne, Australien und ein Holzgebäude in London, Großbritannien miteinander verglichen. Hierbei sei angemerkt werden, dass es sich um kein reines Holzhaus handelt, da die Konstruktion sowohl Beton als auch Holz beinhaltet. Die Länge der Transportdistanz wurde für beide Bauweisen zwischen 15 bis 80 km festgelegt. Die Fallstudienanalyse nimmt an, dass alle Materialien lokal beschafft werden, und betrachtet den Transportweg der Fertigprodukte vom Werk zur Baustelle (Modul A4). Im Ergebnis besitzt das Betongebäude absolut betrachtet THG-Emissionen von 8,9562 t (523,6 kg-CO₂-eq/m²) und das Holzgebäude 6,0865 t (508,8 kg-CO₂-eq/m²). Aus der Zuteilung der absoluten THG-Emissionen zu den jeweiligen Emissionsquellen werden die Werte des Transports ersichtlich (siehe Tabelle 42). In der Fallstudie Beton belaufen sich die THG-Emissionen auf 1,268 t (26,82 kg-CO₂-eq/ton of material), während sich die Emissionen in der Fallstudie Holz auf 970 t (24,3 kg-CO₂-eq/ton of material) belaufen. Angesichts der geringeren Emissionen des Materials Holz gegenüber Beton haben in der zweiten Fallstudie Emissionsquellen wie der Transport oder Stromverbrauch einen höheren prozentualen Anteil als in der ersten Fallstudie. Im direkten Vergleich unterscheidet sich damit der prozentuale Anteil von 14 % Emissionen Transport beim Betonbau nur geringfügig von den 16 % des Holzbaus. Das Resultat der totalen Emissionsmengen demonstriert, dass sich die THG-Emissionen des Transports durch den Einsatz von Holz um ca. 300 t verringern.¹⁵²

Tabelle 42: Absolute THG-Emissionen in Tonnen für jeweils ein Gebäude in Betonbauweise und Holzbauweise

Emissionsquelle	Fallstudie Beton	Prozentsatz	Fallstudie Holz	Prozentsatz
Graue THG-Emissionen des Materials	52067	58 %	2986	49 %
THG-Emissionen des Transports	1268	14 %	970	16 %
THG-Emissionen der Gerätenutzung	597	7 %	413	7 %
THG-Emissionen des Stromverbrauchs	1884	21 %	1716	28 %
Total	8956	100 %	6085	100 %

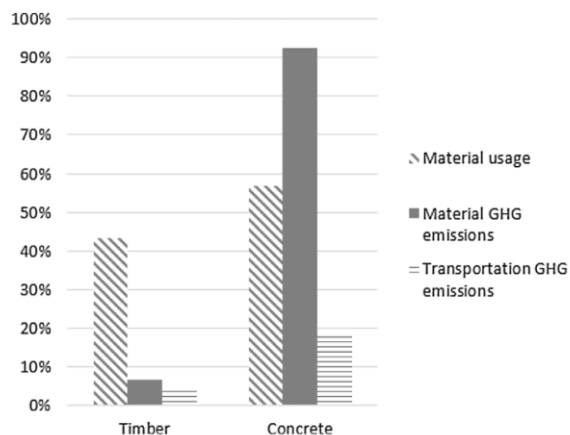
Daten: Sandanayake M. et al. (2017), S.94.

Da es sich bei dem Holzgebäude um eine Hybridvariante handelt, setzen sich die Prozentangaben der Tabelle 42 aus den Baustoffen Holz und Beton zusammen. Die Studie überprüft den jeweiligen Einfluss detaillierter (siehe Abbildung 57). Trotz einer nahezu gleichmäßigen Materialverteilung zeigt das Resultat, dass Holz mit 7 % zu den totalen THG-Emissionen und mit 24 % zu den Transportemissionen beiträgt. Demnach lassen sich mit dem Baustoff Holz graue Energieemissionen sowie, infolge des geringen Gewichts, die Transportemissionen verringern.¹⁵³

¹⁵² Vgl. Sandanayake et al. (2017)

¹⁵³ Vgl. Sandanayake et al. (2017)

Abbildung 57: Materialzusammensetzung und THG-Emissionen in Fallstudie B



Quelle: Sandanayake M. et al. (2017), S.95.

In der Studie von Pohl (2017) werden die Auswirkungen von Importholzwerkstoffen auf die Nachhaltigkeitsqualität daraus errichteter Wohngebäude untersucht. Grundlage hierfür stellten Szenario-Varianten dar. Das Basisszenario beinhaltet ausschließlich einheimische Holzwerkstoffe und damit keine Import-Transportentfernungen, wohingegen die anderen drei Szenarien Importholzwerkstoffe aus Norwegen, Frankreich sowie die mittlere Transportentfernung aus Frankreich, Estland, Polen und Tschechische Republik beachten. Für die norwegischen Transportszenarien gelten in Norwegen ca. 50 km Landweg (Modul A2) + weitere Transportetappen von Norwegen in die Rhein-Main-Metropolregion mit 1.750 km, für französische Import-Szenarien eine Transportdistanz (Modul A2) von bis zu 60 km Landweg + 1.000 km Landweg ins Zielgebiet und für die mittlere Transportentfernung aus den vier größten Bezugsländern ca. 950 km. Betrachtungsgegenstand sind hierbei alle Wandbauteile (Außen- und Innenwände) für einen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren eines Muster-MFH in Holzbauweise für die Lebenszyklusphase Herstellung (Modul A2). Bei Bewertung der Ergebnisse fällt auf, dass die Import-Transporte die Ökobilanz-Ergebnisse gegenüber dem Basisszenario nur im niedrigen einstelligen Prozentbereich verändern. Die Wirkungskategorien GWP und Primärenergiebedarf werden im Folgenden näher erläutert. Für das GWP lässt sich aussagen, dass in allen Szenarien der Aspekt Transport-Importe einen Anteil von ca. 2 % an der Lebenszyklusphase Herstellung beinhaltet. Im Vergleich mit dem Basisszenario, das mit 0 % Anteil des Transportes rechnet, ergeben sich damit prozentuale Veränderungen von 2 % bis 13 %. Am höchsten fällt der Anteil beim Szenario mit Importholzwerkstoffen aus Norwegen aus. Für den Indikator Primärenergie gesamt gilt, dass sich die prozentualen Anteile des Einflusses des Transports zwischen 0 % bis 1 % bewegen. Damit gibt es für den Anteil der Primärenergie keine wesentlichen Änderungen bei verschiedenen Transportwegen.¹⁵⁴

In Pohl (2017) werden ähnlich der vorangegangenen Studien die Transportdistanzen von Bauprodukten in Deutschland betrachtet. Demnach werden für das Bauwesen im Fall Import-Holzprodukte über weite Strecken von Frankreich, Estland, Polen und die Tschechische Republik nach Deutschland importiert, mit entsprechenden ökobilanziellen Umweltwirkungen. Die Transportentfernungen von Importhölzern sind dabei mit im Schnitt 950 km anzusetzen. Im Vergleich zu den Distanzen von einheimischem Holz mit 175 km und mineralischen Rohstoffen mit 50 km liegen die Importhölzer damit um den Faktor 5,4 bzw. Faktor 19 höher. Bei der Anwendung der Datensätze für Holz aus Deutschland und Import Holz in einer Variantenbildung

¹⁵⁴ Vgl. Pohl (2017)

für die Ökobilanz eines gesamten Holzgebäudes zeigt sich jedoch, dass die Unterschiede sich nur sehr geringfügig auf die Umweltauswirkungen des gesamten Gebäudes über alle Lebenszyklusphasen auswirken.¹⁵⁵

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die festgelegten Transportdistanzen in den verschiedenen Studien stark variieren. Dies gründet sich auf der Analyse in unterschiedlichen Ländern und u. a. deren Marktsituation, Landesgröße sowie Infrastruktur. Aus den ersten beiden Studien lässt sich ableiten, dass in Deutschland und in der Schweiz vor allem Holz aus dem Inland für den Holzbau verwendet wird und damit die Distanzen eher gering ausfallen. Die zuletzt dargestellte Studie sagt aus, dass bei der Fallstudie Verwendung von Importhölzern in Deutschland Distanzen von bis zu 950 km anfallen. Des Weiteren folgt aus der dritten genannten Studie, dass sich der Parameter Transportdistanz bei einer Erhöhung negativ auf sowohl den Primärenergieverbrauch als auch die CO₂-Bilanz auswirkt. Dies gilt für die Holz- und die Zementbauweise, wobei sich eine Erhöhung von beispielsweise 200 km bei der Massivbauweise mit Zement deutlicher auswirkt, insbesondere aufgrund des Materialgewichts. Weiter kann angeführt werden, dass sich in der vierten Studie der prozentuale Anteil an den Transportemissionen mit 14 % beim Betonbau nur geringfügig von denen des Holzbaus mit 16 % unterscheidet. Hierbei muss jedoch erwähnt werden, dass aufgrund der geringen grauen Emissionen des Holzmaterials selbst die prozentualen Anteile beim Holz anders gewichtet sind und dadurch die Transportemissionen prozentual höher ausfallen als beim Betonbau.

In der überwiegenden Anzahl der Studien hat der Transport im Vergleich zu den anderen Lebenszyklusphasen unabhängig von der Transportdistanz einen wenig relevanten Anteil an den Umweltauswirkungen.

8.4.3 Nachwuchspotenzial von Holz

In König et al. (2011) werden vergleichende Ökobilanzen für fünf Gebäude mit unterschiedlichen Nutzungskategorien mit jeweils einer Holzbauweise und Massivbaukonstruktion ange stellt. Als besondere Zielstellung wurde angestrebt das Nachwuchspotenzial von Gebäuden zu ermitteln. Der bisher noch nicht anerkannte bzw. verbreitete Indikator stellt quantitativ dar, wie viel Holz in dem Zeitraum nachwächst, in der das Holz für die Erstellung von Gebäuden eingesetzt wird. So kann eine Verknüpfung der Kohlenstoffbindung im Wald durch nachwachsendes Holz mit der Kohlenstoffspeicherung des verwendeten Holzes in Gebäuden hergestellt werden. Die Berechnungsmethodik auf Basis von statistisch erhobenen Daten der Hauptbaumarten Deutschlands und des Sortimentsanfalls (Einteilung in Stammholz, Industrieholz, Energieholz und nicht verwertbar) erlaubt eindeutige Quantifizierungen der benötigten Flächen und Baumarten, je nach dem Anteil nachwachsender Rohstoffe, für ein spezifisches Gebäude.

Die Ergebnisse der untersuchten Studie sind stark von getroffenen Annahmen bei der Berechnung abhängig. Verschiedene Einflussfaktoren wie Baumarten, Standorte, Nutzungsmaßnahmen, Sortimentsaushaltung sowie Produktarten wirken auf das Nachwuchspotenzial von Holz, sodass deren Auswirkungen in weiteren Studien mittels Szenarien dargestellt werden müssen. Jedoch kann eine erste Einschätzung des Nachwuchspotenzials für verschiedene Holzprodukte getroffen werden (siehe Tabelle 43). Das Nachwuchspotenzial wurde auf drei unterschiedliche Arten quantifiziert: 1. in m³/(ha a), 2. in kg CO₂/m³] und 3. in kg CO₂/(ha a). Mit Hilfe einer prozentualen Darstellung wird ersichtlich, dass Fichtenschnittholz und Fichten-Furnierschichtholz das höchste Nachwuchspotenzial aufweisen. Die prozentuale Darstellung des Nachwuchspotenzials zeigt damit auf, dass Holzprodukte mit hohem Stammholzanteil und hoher Ausbeute das größte

¹⁵⁵ Vgl. Life Cycle Engineering Experts GmbH

Potenzial bieten. Bei Betrachtung der Kohlenstoffbindung pro m³ sowie pro ha steht ebenfalls Fichtenschnittholz mit 347 kg sowie ca. 5.000 kg CO₂ am besten da.¹⁵⁶

Tabelle 43: Nachwuchspotenziale für wesentliche Holzprodukte aus den Hauptbaumarten Fichte, Kiefer, Buche und Eiche¹⁵⁷

Produktkategorie	Nachwuchspotenzial [%]	Nachwuchspotenzial [m ³ /(ha a)]	Nachwuchspotenzial [kg CO ₂ /m ³]	Nachwuchspotenzial [kg CO ₂ /(ha a)]
Fichtenschnittholz	44	6,4	347	5.034
Kieferschnittholz	30	3,0	270	2.724
Buchenschnittholz	18	1,8	225	2.246
Eichenschnittholz	24	2,0	286	2.405
Fichten-Brettschichtholz	32	4,6	253	3.661
Kiefern-Brettschichtholz	22	2,2	198	1.998
Fichten-Furnierschichtholz	40	5,8	316	4.576
Kiefern-Furnierschichtholz	27	2,7	243	2.452
Spanplatte	19	2,4	172	2.106
OSB	15	2,0	123	1.610
Holzweichfaserplatte	27	3,9	213	3.089

Daten: König et al. (2011): Bauen mit Holz – Wege in die Zukunft, S. 32

Zur Berechnung des Nachwuchspotenzials wurde geprüft, wie hoch der Zuwachs der verschiedenen Holzarten pro Jahr ist. Einen Überblick bietet hierzu Tabelle 44. Am schnellsten wächst die Fichte mit 14,5 m³ pro ha und Jahr, an zweiter Stelle stehen die Kiefer und die Buche mit ca. 10 m³. Die Eiche weist mit 8,4 m³ pro ha den geringsten jährlichen Zuwachs auf. Aufgrund der hohen mittleren Rohdichte von Buche und Eiche ist jedoch deren Kohlenstoffbindung bezogen auf den Kubikmeter mit 1.247,8 kg CO₂/m³ (Buche) sowie 1.192,8 kg CO₂/m³ (Eiche) am höchsten. Bezogen auf den jährlichen Zuwachs pro ha kann die Buche mit einer Menge von 12.478 kg CO₂/(ha a) am meisten Kohlenstoff binden, auf Platz zwei steht die Fichte mit 11.441 kg CO₂.¹⁵⁸

¹⁵⁶ Vgl. König et al. (2011)

¹⁵⁷ Vgl. König et al. (2011)

¹⁵⁸ Vgl. König et al. (2011)

Tabelle 44: Zuwächse, Rohdichten und C-Bindung der Hauptbaumarten

Baumart	Zuwachs [m ³ /(ha a)]	Mittlere Rohdichte atro [kg/m ³]	Zuwachs atro [kg / (ha*a)]	C-Bindung [kg CO ₂ /m ³]	Zuwachs ent- spricht C-Bindung von [kg CO ₂ /(ha a)]
Fichte	14,5	430	6.235	789,1	11.441
Kiefer	10,1	490	4.949	899,2	9.081
Buche	10,0	680	6.800	1.247,8	12.478
Eiche	8,4	650	5.460	1.192,8	10.019

Daten: König et al. (2011): Bauen mit Holz – Wege in die Zukunft, S. 29

Im Rahmen einer vergleichenden Ökobilanzierung wurden fünf Gebäude ausgewählt, die in vielen Bauteilen nachwachsende Rohstoffe einsetzen und große Unterschiede in der Größenordnung aufweisen. Die Gebäude stammen aus den Jahren 2005 bis 2011 und besitzen Kubatur-Unterschiede (BRI) zwischen 6.000 und 25.000 m³ sowie Unterschiede in der Bruttogrundfläche (BGF) zwischen 1.500 und 7.000 m².¹⁵⁹

Es wurden nur Gebäude ausgesucht, deren Tragkonstruktion hauptsächlich aus Holz besteht. Für die Auswertung wurden die unterschiedlichen Materialien nach folgenden Baustoffgruppen unterschieden:

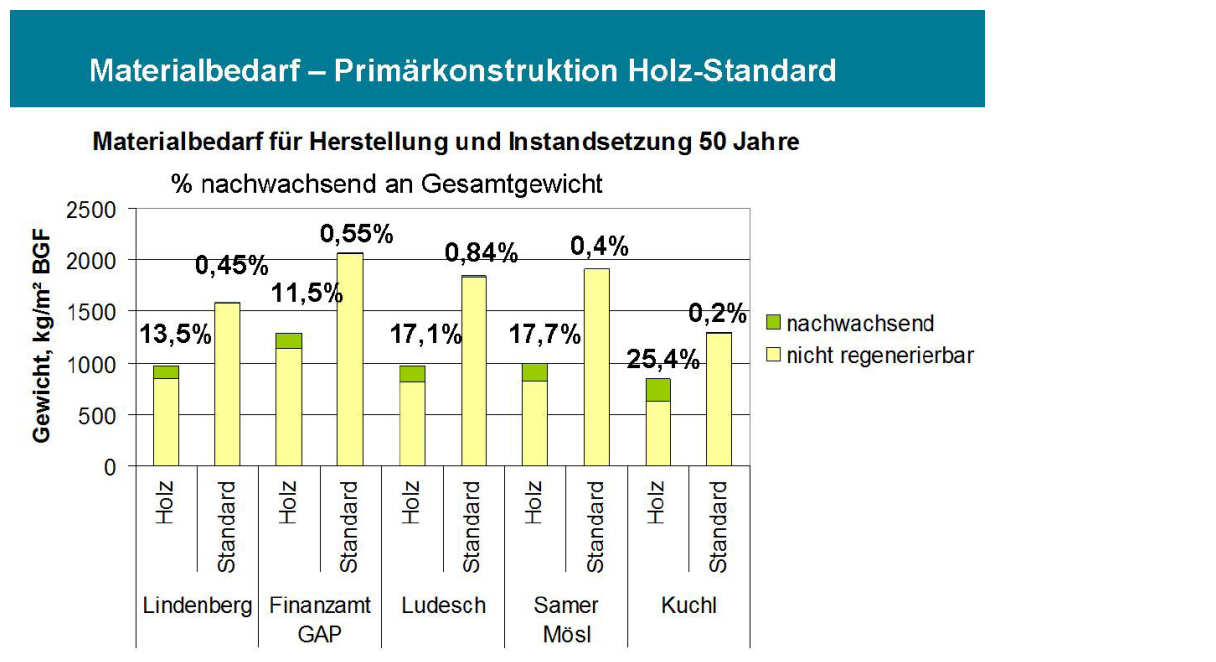
- ▶ Nicht-erneuerbare Rohstoffe (mineralisch, metallisch, synthetisch)
- ▶ Nachwachsende Rohstoffe (Holz, Pflanzen- und Tierfasern).

Aufschluss über die jeweilige Materialzusammensetzung der fünf betrachteten Objekte bietet die Abbildung 58. Aufgrund der unterschiedlichen Gebäudegrößen ist die Bezugsgröße 1 m² BGF über Terrain mit der Einheit kg. Im Vergleich der fünf verschiedenen Primärkonstruktionen aus Holz zeigt sich, dass die Gebäude aus nachwachsenden Rohstoffen 50 % bis 65 % des Gewichts von Gebäuden aus nicht erneuerbaren Rohstoffen erreichen. Überdies wird ersichtlich, dass bei den konventionellen Bauweisen der Anteil an nachwachsenden Rohstoffen am Gesamtgewicht des Gebäudes mit 0,5 % bis 1 % sehr gering ausfällt. Dagegen erreichen Gebäude mit vielen Bauteilen aus nachwachsenden Rohstoffen bis zu 25 % des Gesamtgewichts. Einen höheren Anteil erreicht die Materialgruppe nachwachsende Rohstoffe jedoch nicht, weil die relativ wenigen mineralischen und metallischen Bauteile in den Holzgebäuden eine sehr hohe Rohdichte besitzen. Bei höhergeschossigen Gebäuden (die geprüften Gebäude weisen meist nur zwei Geschosse auf) würde sich der Einfluss der mineralischen Bodenplatte relativieren und damit den Anteil der nicht-erneuerbaren Rohstoffe am Gesamtgewicht minimieren.¹⁶⁰

¹⁵⁹ Vgl. König et al. (2011)

¹⁶⁰ Vgl. König et al. (2011)

Abbildung 58: Materialkonzepte Gebäude, gesamt, nicht regenerierbar, nachwachsend



Quelle: König et al. (2011): Bauen mit Holz – Wege in die Zukunft, S. 57.

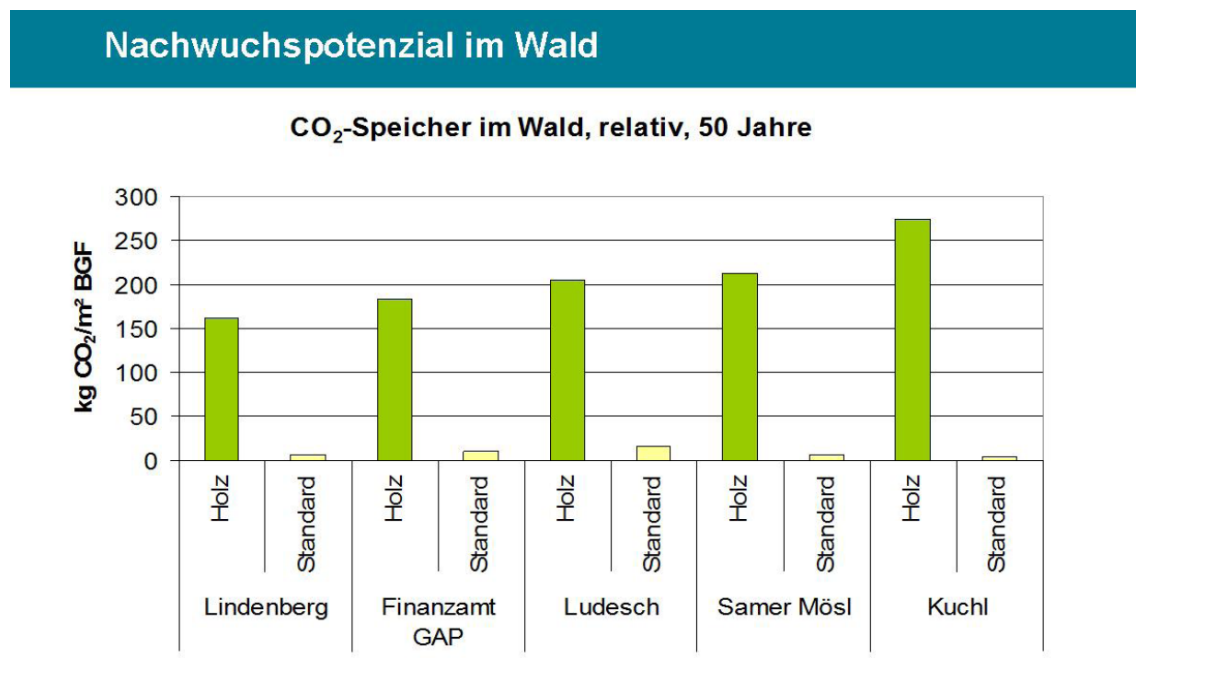
Für die Einschätzung des objektbezogenen Nachwuchspotenzials der fünf Gebäude wurde eine separate Untersuchung durchgeführt. Hierbei galt es herauszufinden, wie sich der Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen bei der Primärkonstruktion (Außenwände, Innenwände, Decken und Dach) auf die Entlastung der Ökosysteme auswirkt. Einerseits entlastet das realisierte Gebäude die Umwelt, ausgedrückt durch die Ökobilanz, andererseits wächst auf der freigewordenen Waldfläche neues Holz heran. Zukünftig kann dieses Holz weitere nicht erneuerbare Ressourcen ersetzen, ausgedrückt durch das Substitutionspotenzial. Dieses Potenzial wird in der Ökobilanz nach europäischer Normung für Nachhaltigkeit in einem vierten Modul D ausgedrückt, worin Potenziale angegeben werden, die die Systemgrenze der drei Phasen A bis C überschreiten. Hier werden Recyclingpotenziale von Produkten deutlich. Beispielsweise kann für Bauprodukte aus nachwachsenden Rohstoffen das Substitutionspotenzial für Bauteile aus nicht erneuerbaren Ressourcen kalkuliert werden.¹⁶¹

Für die Ergebnisse absoluter CO₂-Speicherung in einem Zeitraum von 50 Jahren wurde für das Modul D Folgendes berechnet: Das Objekt „Samer Mösl“ ermöglicht eine absolute Speichermenge von ca. 1.300.000 kg CO₂, wobei eine Standardbauweise nur in einer kleinen Kohlenstoffspeichermenge von < 100.000 kg CO₂ resultiert. Für alle Objekte gilt, dass die Holzbauweise einen größeren CO₂-Speicher als die Standardbauweise mit sich bringt. Das Objekt „Kuchl“ scheidet bei der absoluten Untersuchung mit ca. 400.000 kg CO₂ am schlechtesten ab. Die nachstehende Abbildung 59 zeigt die möglichen Substitutionspotenziale bezogen auf m² BGF, 50 Jahre, Modul D. Diese relative Untersuchung zeigt, dass bezogen auf m² BGF das Objekt „Kuchl“ mit ca. 275 kg CO₂/m² BGF am besten abschneidet. Das Objekt aus Lindenberg steht an vierter Stelle, mit ca. 160 kg CO₂/m² BGF speichert der Wald am geringsten Kohlenstoff im Vergleich mit den anderen Objekten. Für die Standardbauweise ähneln sich die Speicherungswerte stark, auf ca. 5 bis 30 kg CO₂/m² BGF belaufen sich diese.¹⁶²

¹⁶¹ Vgl. König et al. (2011)

¹⁶² Vgl. König et al. (2011)

Abbildung 59: Nachwuchspotenzial in kg CO₂/m² BGF durch Holznutzung in den Objekten, relative Menge



Quelle: König et al. (2011), S. 68.

Abschließend lässt sich sagen, dass die fünf untersuchten Gebäude einen Holzverbrauch zwischen 0,211 bis 0,332 m³/m² BGF ohne UG aufweisen, wobei ableitend aus Tabelle 44 z. B. Fichtenholz 0,00145 m³/m² a oder Eichenholz 0,00084 m³/m² a nachwächst. Für das Treibhauspotenzial wurde in der Ökobilanz berechnet, dass der Holzbau die Atmosphäre mit 36 % (Lindenberg) bis 70 % (Kuchl) gegenüber der Standardbauweise entlastet. Anzumerken ist hierbei, dass das gespeicherte Kohlendioxid in den Gebäuden während der Nutzungsphase, am Ende des Lebenszyklus thermisch verwertet wird. Für das Nachwuchspotenzial im Wald (50 Jahre, relativ) gilt, dass bei einer Ernte Holz im Wald wieder nachwächst und sich dadurch in den untersuchten Häusern zwischen ca. 160 bis ca. 275 kg CO₂/m² BGF speichern lassen.¹⁶³

Eine weitere Studie von Börjesson P., Gustavsson, L. (1999)¹⁶⁴ nimmt einen Ökobilanzvergleich (Module A bis C) zwischen Holz- und Massivbauweise am Beispiel eines viergeschossigen Wohngebäudes vor und berücksichtigt u. a. die Auswirkungen auf Landnutzungsänderungen. Es wird angenommen, dass eine Waldfläche von 2 ha für die Produktion des Holzgebäudes erforderlich ist. Basiert die Primärenergie für die Produktion der Gebäudematerialien rein auf Bioenergie aus forstwirtschaftlichen Erzeugnissen, fällt bei der Holzbauweise die zu erntende Waldfläche für Rohmaterialien und Energie zweimal größer (3.500 GJ werden benötigt und entsprechen ca. 2 ha Waldfläche) im Vergleich zu der Betonbauweise (1.750 GJ benötigter Bioenergie entspricht einer zu erntenden Waldfläche von ca. 1 ha) aus. Jedoch kann bei der Holzbauweise überschüssige Energie (950 GJ) aus Holzabfällen sowie Abholzungsreste für den Austausch von fossilen Brennstoffen oder zur Wiederverwendung eingesetzt werden. Dadurch resultiert eine zwei- bis dreimal höhere THG-Minderungseffizienz (t CO₂-Äqu./2 ha forest land) bei der Holzbauweise mit - 60 bis - 70 t CO₂-Äqu., gegenüber einer Betonbauweise mit ca. -12 bis -39 t CO₂ Äqu. (innerhalb 100 Jahre, 1 Rotationsperiode des Waldes). Bei einer Betrachtung größer als einer Rotationsperiode des Waldes steigt die THG-Minderungseffizienz der Holzbau-Alternative

¹⁶³ Vgl. König et al. (2011)

¹⁶⁴ Vgl. Börjesson, Gustavsson (1999)

um den Faktor drei bis fünf in einer 300 Jahre-Perspektive. Ferner bestätigen die Ergebnisse vorhergehende Erkenntnisse von IPCC, dass ein Einsatz von Biomasse anstelle fossiler Brennstoffe und damit die Verwendung von Holzprodukten eine effizientere Methodik zur Reduktion von CO₂-Emissionen darstellt, als den Wald unberührt als bloße Kohlenstoffs Senke zu belassen.¹⁶⁵

8.4.4 Modul D – Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze

Der Lebenszyklusphasenabschnitt Modul D (Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze) behandelt Umweltauswirkungen und Gutschriften, die sich aus dem Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- und Recyclingpotenzial ergeben. Nach DIN EN ISO 14044 sind diese im Rahmen der Erstellung einer Ökobilanz lediglich informativ auszuweisen.

Für die einzelnen Baustoffgruppen und die Betrachtung des Gesamtsystems Gebäude können sich große Unterschiede hinsichtlich des Potenzials der Gutschriften ergeben. Daher hat die Addition des Moduls D zu dem Gesamtergebnis der Umweltauswirkungen über alle Lebenszyklusphasen, wie es in einigen Studien durchgeführt wurde, einen sehr hohen Einfluss.

Die Akzeptanz der Umsetzung des Moduls D im Rahmen der Vorgaben der Normierung ist von Branche zu Branche unterschiedlich. Der lange Lebenszyklus im Bereich Gebäude erschwert die Bestimmung des Potenzials. Nicht alle Bauteile bleiben über diese Zeit erhalten und nicht alle Bauteile lassen sich mit vertretbarem Aufwand so trennen, dass eine geplante Wiederverwertung technisch bzw. finanziell durchgeführt werden kann. In einem Bericht des wissenschaftlichen Dienstes des Deutschen Bundestages aus 2017¹⁶⁶ beschreibt die Arbeitsgruppe Modul D des Runden Tisches Nachhaltiges Bauen des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB) bzw. des Bundesamts für Bauwesen und Raumordnung (BBR) die Situation insofern, als dass der Umgang mit End-of-Life-Prozessen in der Ökobilanzierung und Nachhaltigkeitsbewertung in der Fachwelt kontrovers diskutiert wird. Die Diskussionen fokussieren sich sowohl auf die Ebenen Baustoffe und Bauteile als auch auf die Gebäudeebene. Schwerpunkte der Debatte sind hierbei die Definition des Moduls D, seine Abgrenzung vom Modul C sowie die Verifizierung von Prognosen zu Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- oder auch Recyclingpotenzialen am Ende des Lebenszyklus. Eine Verrechnung des Moduls D mit den Modulen A bis C wird von Seiten der Normung auf Produktebene nicht zugelassen. Es ist nach der aktuellen Normung lediglich informativ anzugeben.

Für das Modul D bestehen große Datenlücken für einzelne Baustoffe. Für die mineralische Bauweise beispielsweise stehen wenige Daten zur Verfügung. Für den Bereich Gips liegen verschiedene Szenarien vor, mit deren Hilfe die Anwender verschiedene Möglichkeiten der Wiederverwertung ausdrücken können. Künftig sollen Datensätze erstellt werden, mit denen das Modul transparent in der ÖKOBAUDAT bewertet werden kann.

Vor allem beim Vergleich zwischen unterschiedlichen Produkten bzw. Bauweisen führt die Anrechnung von Potenzialen des Baustoffs Holz zu großen Veränderungen in den Ergebnissen zu Umweltauswirkungen. Für Modul D besteht daher noch weiterer Forschungsbedarf.

Für Quellen, die das Modul D bei einem Vergleich der Bauweisen miteinfließen lassen, zeigt die Studie von Albrecht et al. (2008) ähnliche Ergebnisse. Dort wurden die Umweltindikatoren, hier beispielhaft das Treibhauspotenzial, verschiedener Bauweisen für Innenwände gegenübergestellt. Dabei wird ersichtlich, dass Modul D (Gutschrift Strom und Dampf bzw. Recyclingpotenzial) bei einer Holzständerwand einen sehr hohen Einfluss auf das Gesamtergebnis besitzt.

¹⁶⁵ Vgl. Börjesson, Gustavsson (1999)

¹⁶⁶ Wissenschaftliche Dienste – Deutscher Bundestag – Einzelfragen zur Ökobilanzierung von Gebäuden Modul D

Dadurch schneidet bei einem Vergleich über alle Phasen (Module A bis D) die Holzbauweise im Vergleich zur Massivwand wesentlich günstiger ab.

In den Ergebnissen einer vergleichenden Ökobilanz von König (2011) zeigt sich bei einer Bilanzierung von allen Modulen (A bis D), dass die Holzbauweise gegenüber der Massivbauweise für den nicht erneuerbaren Primärenergiebedarf bis zu 129 % und bezüglich des Treibhauspotenzials bis zu 124 % geringere Umweltauswirkungen verursacht.¹⁶⁷

Auch in König (2017)¹⁶⁸ wurden die Ergebnisse der unterschiedlichen Bauweisen für das Modul D verglichen. Die Berechnungen für das Modul D zeigten bei allen Umweltindikatoren, außer beim Indikator Primärenergie erneuerbar (PER), negative Werte an, die im Verhältnis zu den positiven Werten der Phasen für die Herstellung, die Instandhaltung bzw. den Ersatz und den End-of-Life (A1 bis A3, B, C3 und C4) stehen. Die Ursache für die Zunahme der erneuerbaren Primärenergie liegt in der thermischen Verwertung der Bauprodukte, bei der über die Kraft-Wärme-Kopplung elektrische Energie bereitgestellt werden kann. Gegen eine Verrechnung der Werte der verschiedenen Module miteinander gibt der Autor an, dass die jeweils verwendeten Berechnungsdaten aus unterschiedlichen Quellen stammen.

Die Möglichkeiten zur Bilanzierung von Holz im Modul D sind vielfältig. In der Regel wird eine Substitution von Wärme aus Erdgas sowie Elektrizität zu Grunde gelegt. Alternativ besteht die Möglichkeit einer stofflichen Weiternutzung. Unter den Rahmenbedingungen großer, nachhaltig bewirtschafteter Waldflächen, wie sie in Europa bestehen, erzeugt jeder genutzte Stamm Platz für nachwachsende Bäume und vermehrt den Kohlenstoffspeicher. Wird das Nutzholz nicht verbrannt, das CO₂ also wieder freigesetzt, sondern einer langfristigen stofflichen Nutzung zugeführt, wie es bei Bauprodukten in günstiger Weise der Fall ist, entsteht ein zusätzlicher Kohlenstoffspeicher zum Wald. Dieses Potenzial wird in einigen Studien mit Schwerpunkt auf der Kaskadennutzung untersucht. Je länger ein Gebäude bestehen bleibt, desto stärker wird sich dieser Effekt auswirken. Außerdem lassen sich mit nachwachsendem Holz zukünftig wieder endliche Rohstoffe ersetzen, was sich im Substitutionspotenzial ausdrückt.

8.4.5 Technische Gebäudeausstattung

Die Wahl des Energiestandards hat durch die lange Nutzungsdauer von Gebäuden einen großen Einfluss auf die CO₂-Bilanz und den Primärenergieverbrauch.

Die Auswirkungen der Haustechnik in den Modulen A, C und D werden jedoch als gering eingestuft. In den meisten Studien zu vergleichenden Ökobilanzen wird der Aspekt Haustechnik ausgeklammert und nicht in die Bilanzierung integriert. Kellenberger et al. (2008) begründen es dadurch, dass es keinen relevanten Unterschied bezüglich der Umweltauswirkungen bei der Nutzung einer Gas- oder Ölheizung gibt. Krötsch (2018) und Graubner et al. (2008) geben an, dass die technische Gebäudeausrüstung wie Sanitär-, Heizungs-, Lüftungs- und Elektroinstallation, die sich ebenfalls kaum durch biogene Baustoffe ersetzen lässt, wenig relevant ist. In den Studien wird als Grundlage für den Vergleich in der Regel, wie auch z. B. bei Müller et al. (2015), ein Gebäude mit in jeder Variantenbetrachtung nahezu identischer Gebäudetechnik modelliert.

Die Studie von König (2017) ist eine der wenigen Studien, in der im Rahmen der vergleichenden Ökobilanzierung von Massiv- und Holzgebäuden Varianten für unterschiedliche Wärmeerzeuger modelliert werden. Bei einem Vergleich verschiedener Heizwärmeerzeuger in einem modellierten EFH in sechs unterschiedlichen Bauweisen zeigte sich, dass die Unterschiede zwischen

¹⁶⁷ Vgl. König (2011)

¹⁶⁸ Vgl. König (2017)

den Heizwärmeerzeugern in den Umweltauswirkungen Treibhauspotenzial und Primärenergiebedarf bei allen betrachteten Bauweisen (Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton, Hybridbauweise, Holzrahmen, Massivholz) ähnlich groß sind. Zudem zeigte sich, dass, je niedriger der Heizwärmebedarf ist, desto weniger Einfluss unterschiedliche Heiztechniken auf die Umweltauswirkungen haben.¹⁶⁹

8.4.6 Geschossigkeit

Im Nachfolgenden werden Studien beschrieben, in denen eine Sensitivitätsanalyse zu der Fragestellung durchgeführt wurde, ob die Anzahl der Geschosse eines Gebäudes eine Rolle bei dem Vergleich der Bauweisen spielt.

In der Studie Hafner, Schäfer (2017) wird die Holzbauweise (Brettsperrholz-, Holzrahmen- und vorgefertigte Holzhäuser) der Massivbauweise (Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton und Stahlbeton) mittels einer Substitutionsfaktorberechnung gegenübergestellt. Insgesamt sind 25 Ein- bzw. Zweifamilienhäuser mit bis zu drei Geschossen (BGF: 130 m² bis 380 m²) und 15 mehrgeschossige Wohnbauten mit drei bis acht Geschossen (BGF: 720 m² bis 6.150 m²) bilanziert worden. Die Objekte wurden in Deutschland und Österreich innerhalb der Jahre 2006 bis 2014 errichtet. Die Studie berücksichtigt die in Kapitel 8.1.2 angegebene Normenreihe mit der ÖKOBAUDAT 2015 als Datenbank. Die Lebenszyklusphasen wurden in die Module nach DIN EN 15978 eingeteilt. Folgende Module wurden bilanziert: A1 bis A3 (Herstellung), B4 (Ersatz), B6 (Energieeinsatz im Betrieb), C3 (Abfallbehandlung), C4 (Beseitigung) und Modul D (lediglich als zusätzliche Information separat ausgezeichnet).¹⁷⁰ Die Studie kommt zu dem Ergebnis, dass höhere, mehrgeschossige Holzgebäude im Vergleich anteilig einen geringeren Beitrag zur Treibhausgasreduktion über den Lebenszyklus des Gebäudes leisten. Dies gründet sich auf den zu berücksichtigenden Brandschutzaufgaben, welche mit der Geschosshöhe zunehmen und damit einen größeren mineralischen Baumaterialeinsatz erfordern. Daher sind im Allgemeinen die Substitutionsfaktoren für Ein- bzw. Zweifamilienhäuser größer als für mehrgeschossige Wohngebäude. Für kleinere EFH wurde ermittelt, dass die Holzbauweisen bei der Betrachtung über die betrachteten Lebenszyklusphasen zwischen 77 und 207 kg CO₂ eq/m² BGF weniger verursachen. Im Vergleich bedeutet das, dass in den Modulen A und C alle analysierten Ein- bzw. Zweifamilienhäuser weniger CO₂ emittieren als ihre mineralischen Pendanten. Die berechneten Substitutionsfaktoren für kleinere EFH aus Holz zeigen, dass sich für die Module A und C mit Verwendung von Holz Minderungspotenziale von THG-Emissionen zwischen 35 % und 56 % ergeben. Die Unterschiede des Vergleichs an THG-Emissionen für mehrgeschossige Wohnbauten bewegen sich zwischen 18 und 178 kg CO₂ eq/m² BGF, welche analog zu den EFH weniger CO₂ emittieren als die mineralischen Pendanten. Die Substitutionsfaktoren zeigen Minderungspotenziale von 9 % bis 48 % bei den Holzwohnbauten. Die Spannweite der Potenziale erklärt sich u. a. durch die unterschiedlichen eingesetzten Materialien, der individuellen Gebäudegestaltung, der Form, der Höhe und der Lage des Gebäudes sowie des Bebauungsplans. Zum Beispiel ist in Deutschland für mehrgeschossige Gebäude keine Wärmedämmung aus erneuerbaren Baustoffen zugelassen. Des Weiteren können die Brandschutzaufgaben bei höheren Gebäuden zum Einsatz von Verkleidungen mit nicht brennbarem Gipskarton führen, welcher die positiven, ökologischen Effekte eines Holzgebäudes zum Teil wieder aufheben und auf Bauteilebene im Vergleich zu Stahlbetonsäulen schlechtere LCA-Ergebnisse bewirken kann.¹⁷¹

¹⁶⁹ Vgl. König (2017)

¹⁷⁰ Vgl. Hafner, Schäfer (2017)

¹⁷¹ Vgl. Hafner, Schäfer (2017)

Zu einer abweichenden Erkenntnis kommt die Studie von Skullestad et al. (2016). Darin wurde eine Lebenszyklusanalyse von jeweils einem Gebäude mit Geschosshöhen von 3, 7, 12 und 21 durchgeführt. Die Gebäudedaten basieren auf drei Gebäuden in den USA. Für das Gebäude mit 21 Geschossen bildete ein Hotel in Norwegen die Vorlage. Die Holzbaukonstruktionen sind derart dimensioniert, dass sie dieselben Eigenschaften wie Lastfall, Fußabdruck und Höhe aufweisen wie die Vergleichsobjekte aus Stahlbeton. Mit Hilfe von drei Berechnungsansätzen für die LCA nach dem Cradle-to-Gate-Prinzip, welche sich hinsichtlich Analysenperspektive, Allokationsmethodik und Modellierung von biogenem CO₂ sowie Karbonisierung von Beton unterscheiden, wird die Relation zwischen Gebäudehöhe und dem Potenzial zur Reduzierung der Treibhausgasemissionen untersucht. Verglichen werden dabei die Klimawandelauswirkungen (Climate Change Impact) der Gebäude, welche sich aus den Emissionen der Module A1 bis A3 zusammensetzen. Die ersten beiden Berechnungsansätze beinhalten die Module A1 bis A3, der Ansatz 3 zuzüglich das Modul D (entsprechend DIN EN 15643-2). Das Ergebnis gibt an, dass Holzbaukonstruktionen geringere Auswirkungen als Stahlbetonkonstruktionen verursachen, siehe nachstehende Tabelle 45 sowie Abbildung 60.¹⁷²

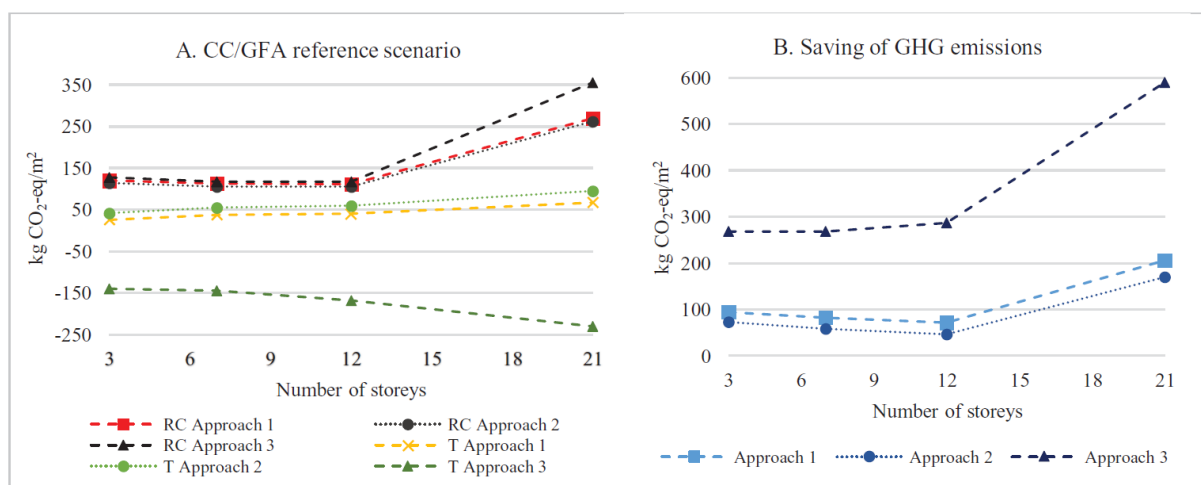
Tabelle 45: Klimawandelauswirkung pro m² BGF für alle Gebäudetypen in Stahlbeton und Holz. Die Einsparungen zeigen die eingesparten THG-Emissionen bei Substitution einer Stahlbeton- durch eine Holzkonstruktion.

Geschosshöhe		CC/BGF (kg CO ₂ -eq/m ²)								
		Referenzszenario			Worst-Case-Szenario			Best-Case-Szenario		
		Stahlbeton	Holz	Einsparung	Stahlbeton	Holz	Einsparung	Stahlbeton	Holz	Einsparung
Ansatz 1	3	121	26	-78 %	179	28	-84 %	83	25	-69 %
	7	112	38	-66 %	166	46	-72 %	77	34	-56 %
	12	112	40	-64 %	165	47	-72 %	77	36	-52 %
	21	270	67	-75 %	442	83	-81 %	178	59	-67 %
Ansatz 2	3	115	42	-64 %	168	43	-74 %	93	41	-56 %
	7	106	55	-48 %	154	62	-60 %	87	52	-40 %
	12	105	59	-44 %	154	66	-57 %	86	57	-34 %
	21	262	95	-64 %	424	110	-74 %	200	89	-56 %
Ansatz 3	3	128	-140	-210 %	151	-140	-193 %	105	-141	-234 %
	7	117	-145	-224 %	139	-143	-203 %	95	-147	-254 %
	12	117	-169	-244 %	139	-167	-220 %	96	-171	-278 %
	21	355	-231	-165 %	404	-227	-156 %	308	-235	-176 %

Daten: Skullestad et al. (2016), S. 120.

¹⁷² Vgl. Skullestad et al. (2016)

**Abbildung 60: A – Vergleich von Klimawandelauswirkung pro m² BGF für Stahlbeton und Holz
B – Absolute Einsparung von Klimawandelauswirkung pro m² BGF durch Substitution von Stahlbeton durch Holzbauweise**



Quelle: Skullestad et al. (2016), S. 120.

Aus der Untersuchung der Module A1 bis A3 folgt, dass sich Holzbau- im Vergleich zu Stahlbetonkonstruktionen um 34 % bis 84 % (abhängig von der Gebäudehöhe und Produktionstechnologien, siehe Ansatz 1 und Ansatz 2) weniger auf den Klimawandel auswirken. Zuzüglich resultiert aus der Analyse, dass mit dem Einsatz von Holzbaukonstruktionen die absolute Einsparung der Klimawandelauswirkung pro m² Grundfläche mit der Anzahl der Geschosse bis einschließlich 12 leicht abnimmt, jedoch zwischen 12 bis 21 Geschossen zunimmt. Die Umkehrung der Einsparung ergibt sich aus dem "bautechnischen Zuschlag". Hochhäuser benötigen stärkere Baustrukturen und haben einen höheren Materialeinsatz pro Grundfläche. Allerdings ist dieser bei einer Holzkonstruktion mit 12 bis 21 Geschossen im Vergleich zu Betonbauwerken erheblich geringer. Resümierend sagt die Studie trotz der methodischen Differenzen aus, dass Holzbaukonstruktionen geringere Klimawandelauswirkungen verursachen als die Vergleichsobjekte in allen Berechnungsansätzen und Szenarien.¹⁷³

In der Studie von König (2011) wird darauf hingewiesen, dass sich die Masse der Bodenplatte und Gründung aus Stahlbeton mit zunehmender Gebäudehöhe relativiert. Da erdberührende Gebäudeteile und teilweise auch Rettungswege nicht aus Holz hergestellt werden können, ist jeder Holzbau auf Bauteile aus Beton angewiesen.¹⁷⁴

8.4.7 Energiestandard

Einfluss des Energiestandards auf die Gesamtökobilanz

Für ein Gebäude, das die heutigen EnEV-2014-Anforderungen erfüllt, wird in der Regel davon ausgegangen, dass die Konstruktion 30 % der gesamten Umweltauswirkungen über den Gebäudelebenszyklus ausmacht und somit der Großteil in der Lebenszyklusphase Nutzung und damit im Energieverbrauch liegt. In König (2017) wurde bei einem 15-kWh-Energieniveau-Gebäude ein Anteil der Konstruktion im Bereich von 70 % festgestellt. Dies verdeutlicht, dass künftig bei noch höheren Energiestandards Verbesserungen der Ökobilanz vor allem durch die Bauweisen erzielt werden können, die materialeffizient und mit geringeren Umweltbelastungen umgesetzt werden.

¹⁷³ Vgl. Skullestad et al. (2016)

¹⁷⁴ Vgl. König (2011)

Als eine der wenigen Studien wird in König (2017) eine Ökobilanzvariantenuntersuchung zur Beantwortung der Frage durchgeführt, mit welcher Bauweise der bauliche Aufwand zur Erreichung unterschiedlicher Anforderungen an den Energiebedarf bei unterschiedlichen Heizwärmeerzeugern am geringsten ist.

Für jede Bauweise (Massiv- und Holzbauweisen) ist innerhalb der Herstellungsphase eine Zunahme des Primärenergieaufwands bei Erhöhung der Anforderungen an den Energiestandard zu verzeichnen.

Für den Vergleich wurden folgende drei Energiestandards für ein EFH herangezogen:

- ▶ EnEV-Neubauanforderungen (seit 01.01.2016), ohne Lüftungsanlage
- ▶ 30 kWh/(m²a) Heizwärmebedarf, mit Abluftanlage
- ▶ 15 kWh/(m²a) Heizwärmebedarf, mit Lüftungsanlage inklusive Wärmerückgewinnung

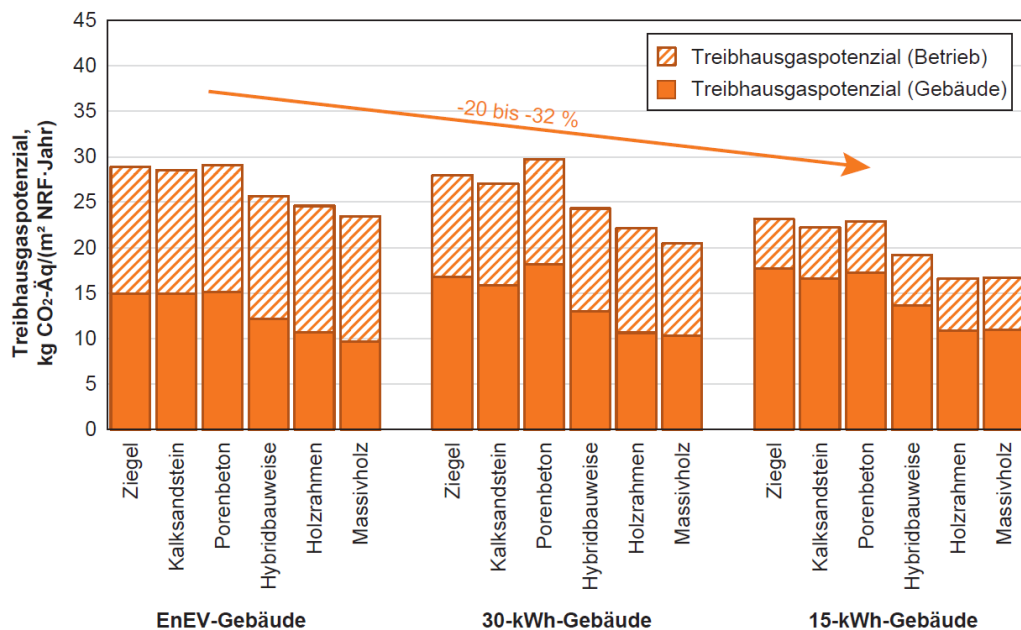
Es ergibt sich für die Gesamt-Primärenergie ein Mehraufwand vom EnEV-2016-Niveau zur 30-kWh-Bauweise zwischen 4,7 % und 14,8 %. Vom 30-kWh-Energieniveau zum 15-kWh-Energieniveau beträgt der Mehraufwand zwischen -1 % und 7,8 %. Für das Treibhauspotenzial zeigt sich ein ähnliches Ergebnis. Durch die unterschiedlichen Materialeigenschaften und Konstruktionsweisen der tragenden Baustoffe können sich die leichten Unterschiede zwischen der Holz- und Massivbauweise ergeben. Beispielsweise besitzt der Holzbau vor allem im Bereich des Wärmedurchgangskoeffizienten der Rollladenkästen und des linearen Wärmedurchgangskoeffizienten der Wärmebrücken einen Vorteil gegenüber dem Massivbau. Dies ist auf die geringere Wärmeleitfähigkeit des Holzes im Vergleich zum Beton zurückzuführen.¹⁷⁵

Gleichzeitig wird auch nachgewiesen, dass die Umweltauswirkungen durch bauliche Maßnahmen für ein höheres Energiestandard-Niveau über die eingesparte Energie in der Nutzungsphase kompensiert werden können. In Abbildung 61 ist die Reduzierung des Treibhauspotenzials bei drei Energiestandards mit den Lebenszyklusphasen für Herstellung, Nutzung inkl. Energiebedarf in der Betriebsphase und Entsorgung dargestellt. Die Einsparung für den 15-kWh-Standard liegt ausgehend vom EnEV-2016-Standard bei 20 % bis 32 % in Abhängigkeit der Bauweise.¹⁷⁶

¹⁷⁵ Vgl. Müller et al. (2015)

¹⁷⁶ Vgl. König (20177)

Abbildung 61: Treibhauspotenzial unterschiedlicher Bauweisen und Energiestandards



Quelle: Unger et al. (2018)

Für die weiteren Umweltindikatoren ist die Reihenfolge der günstigsten Bauweisen (6 Varianten) jeweils bei Betrachtung der Energiestandards (3 Varianten) und verschiedenen Heizwärmeerzeugern (4 Varianten) unterschiedlich. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Kombinationsmöglichkeiten aus der Studie (72 Stück) wird nachfolgend lediglich das Fazit aufgeführt.

Die Gebäude in Ziegel-, Kalksandstein- und Porenbetonbauweise weisen sowohl beim nicht erneuerbaren Primärenergieaufwand (PENR), als auch beim gesamten Primärenergieaufwand (PET) und bei den meisten Wirkungsindikatoren höhere Werte auf als die Gebäude in Hybrid-, Massivholz- und Holzrahmenbauweise. Die Hybridbauweise zeigt kleinere Potenziale zur Umweltentlastung gegenüber den genannten Bauweisen auf. Diese Potenziale vergrößern sich, je mehr nachwachsende Rohstoffe im Gebäude zum Einsatz kommen.

Pajchrowski et al. (2014) haben in ihrer Untersuchung Holz- und Massivbauweisen für unterschiedliche Gebäudekonzepte verglichen. Im ersten Fall wurde ein konventionelles EFH modelliert. In einer zweiten Betrachtung wurde ein Vergleich für ein Passivhauskonzept angestellt. In beiden Szenarien schneidet die Holzbauweise in Bezug zum Primärenergieverbrauch vorteilhaft ab. Im Falle des Passivhauskonzepts fällt die PE-Einsparung jedoch wesentlich geringer aus (-9 % im Vergleich zu -49 % im Falle der konventionellen Bauweise, siehe Tabelle 33).¹⁷⁷

Einfluss der Bauweise auf den Energieverbrauch in der Betriebsphase

In der Regel wird bei den vergleichenden Ökobilanzen der Energieverbrauch in der Nutzungsphase ausgeklammert, da der Vergleich der Auswirkung der Baumaterialien im Fokus steht und für einen sinnvollen Vergleich die Gebäude dazu identisch in ihrer Funktion sein müssen. Als Beispiel wird in Gustavsson, Sathre (2006) pauschal davon ausgegangen, dass es bei einem gleichen Energiestandard keine Unterschiede im Energieverbrauch einer Beton- und Holzbauweise geben sollte.¹⁷⁸ Adalberth et al. (2000) haben ermittelt, dass der Unterschied weniger als 1 %

¹⁷⁷ Pajchrowski et al. (2014)

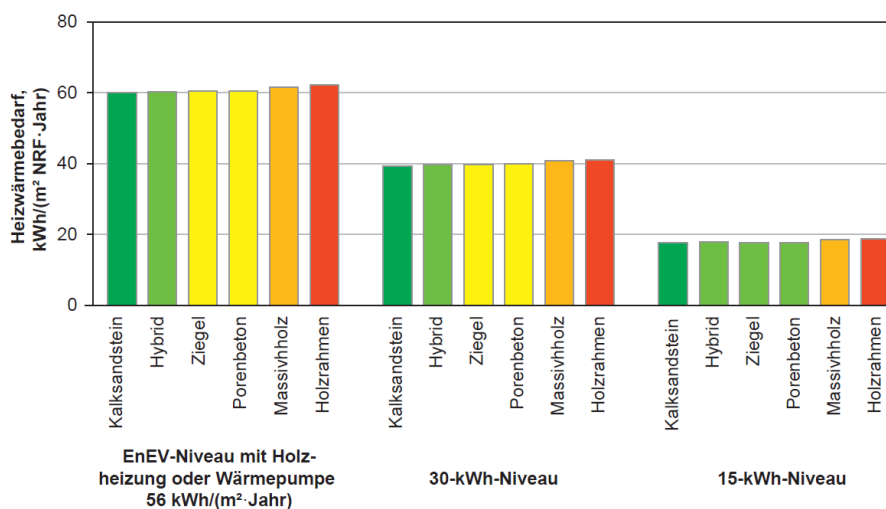
¹⁷⁸ Vgl. Gustavsson, Sathre (2006)

ausmacht¹⁷⁹, und Cole et al. (1996) geben ebenfalls an, dass der Unterschied vernachlässigbar ist.¹⁸⁰

Zudem wird in einer Sensitivitätsanalyse in König (2017) der Einfluss unterschiedlicher Bauweisen bei unterschiedlichem Energieeffizienzstandard auf den Energiebedarf in der Nutzungsphase eines EFH ohne Keller ermittelt. Dazu wurden sechs Bauweisen (siehe Abbildung 62) mit den drei definierten Energiestandards thermisch simuliert.

Es wird deutlich, dass eine höhere Bauteilschwere und die damit verbundene höhere Wärmespeicherfähigkeit der Massivbauweisen bei der Berechnungsmethode der thermischen Simulation zu einem geringeren Heizwärmebedarf führen. Die Unterschiede der Bauweisen sind jedoch gering und betragen abhängig vom Energiestandard 3,6 % bis 6,3 %. Je geringer der Heizwärmebedarf ist, desto höher ist die Auswirkung der Bauweise.¹⁸¹

Abbildung 62: Vergleich Auswirkung des Heizwärmebedarfes bei unterschiedlichen Bauweisen



Quelle: Unger et al. (2018)¹⁸²

8.4.8 Betrachtungszeitraum

Für einen Vergleich der Ergebnisse der Ökobilanzen ist die Wahl des Betrachtungszeitraums von besonderer Bedeutung, da dieser die Austauschzyklen von Bauteilen und den Anteil der Errichtungsphase an den relativen Umweltauswirkungen pro Jahr beeinflusst.

In den recherchierten Quellen wird überwiegend ein Betrachtungszeitraum von 50 Jahren angesetzt. Dieser orientiert sich nach BNB¹⁸³ und DGNB¹⁸⁴ und ist ein Ergebnis politischer Entscheidungen.

In König (2017) wird eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt und die Auswirkungen von 30, 50 und 80 Jahren gegenübergestellt. Im Ergebnis zeigt sich, dass sich bei der Erhöhung des Betrachtungszeitraumes bei allen betrachteten Bauweisen der relative Primärenergiebedarf über die Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und Abriss verringert. Bei einer Erhöhung des Be-

¹⁷⁹ Vgl. Adalberth et al. (2000)

¹⁸⁰ Vgl. Cole et al. (1996)

¹⁸¹ Vgl. König (2017)

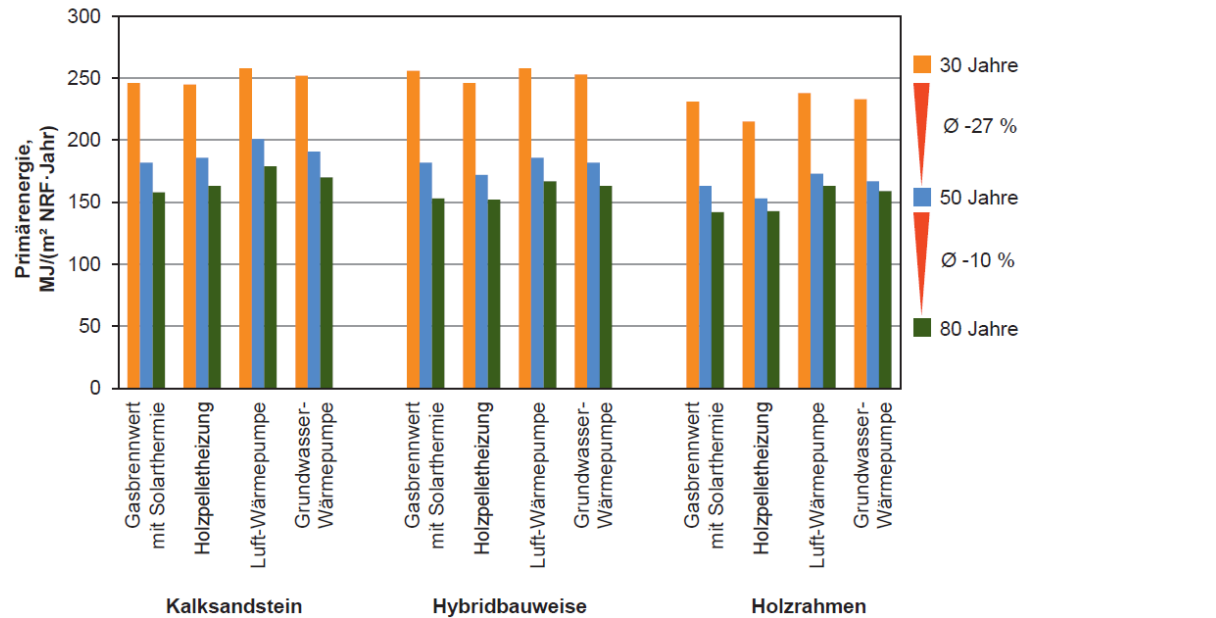
¹⁸² Vgl. Unger (2018)

¹⁸³ Bund für Nachhaltiges Bauen

¹⁸⁴ Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen

trachtungszeitraumes von 30 auf 80 Jahre im Schnitt um 37 %. Grund dafür ist, dass sich die Umweltauswirkungen in der Errichtungsphase des Gebäudes über einen größeren Zeitraum verteilen.¹⁸⁵

Abbildung 63: Vergleich PE gesamt unterschiedlicher Bauweisen und Heizwärmeerzeuger



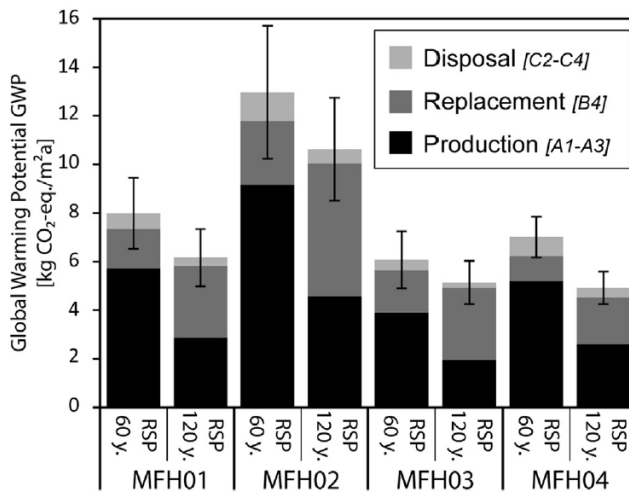
Quelle: Unger et al. (2018), Seite 16

Ähnliches zeigt sich auch in den beiden nachfolgend betrachteten Studien. Häfliger et al. (2017) vergleicht im Rahmen einer Ökobilanzierung von vier MFH (2x Betonbauweise, 1x Holzbauweise und 1x Holz-Massivbauweise) die Unterschiede des Treibhauspotenzials jeweils für die Betrachtungszeiträume 60 und 120 Jahre. Es wurden EPDs als Datenbasis genutzt und die Systemgrenze Cradle-to-Grave (Module A bis C) definiert. Bei den betrachteten Bauweisen zeigt sich ein einheitlicher Trend. Bei einem Wechsel zu dem Betrachtungszeitraum 120 Jahre liegt der größte Anteil des Treibhauspotenzials in der Lebenszyklusphase B4 (Austausch), und die Erhöhung des Betrachtungszeitraums wirkt sich grundsätzlich positiv auf das absolute Ergebnis der Umweltauswirkungen aus. Bei der Holzbauweise ist der Anstieg des Moduls B4 im Vergleich zur Massivbauweise jedoch höher.¹⁸⁶

¹⁸⁵ Vgl. König (2017)

¹⁸⁶ Vgl. Häfliger et al. (2017)

Abbildung 64: Einfluss des Betrachtungszeitraumes auf das Treibhauspotenzial unterschiedlicher Bauweisen



- MFH01 – Massivbauweise
- MFH02 – Holz-Massivbau
- MFH03 – Holzbauweise
- MFH04 – Massivbauweise

Quelle: Häfliger et al. (2017)¹⁸⁷

In Pohl (2016) wurde ein MFH jeweils in Holzständer-, Stahlbeton- und Mauerwerksbauweise modelliert und die Ergebnisse mit den Betrachtungszeiträumen 50 und 80 Jahre verglichen. Die Verlängerung des Betrachtungszeitraums führte zu einer leichten Reduzierung der absoluten Auswirkungen für alle betrachteten Indikatoren und zu einer Abnahme des Einflusses der Herstellungsphase. Abweichend von allen anderen Quellen führt in dieser Studie die Erhöhung des Betrachtungszeitraums dazu, dass die Massivbauweise in den Umweltwirkungen Gesamt-Primärenergie und Treibhauspotenzial im Vergleich zur Holzbauweise besser abschneidet. Grund dafür ist vor allem der angesetzte hohe Austauschzyklus der Holzbauteile, der bei vergleichenden Ökobilanzstudien oftmals zu Kritikpunkten führt.¹⁸⁸

8.4.9 Lebensdauer von Bauteilen

Die Lebenszyklusphasen Herstellung (Module A1 bis A3), Erstellung (Module A4 bis A5) und die Entsorgungsphase (Modul C) bleiben von der Lebensdauer der Bauteile unberührt. Lediglich die Nutzungsphase (Module B1 bis B7) wird vom Betrachtungszeitraum beeinflusst, denn der Austausch von Bauteilen nach Ablauf einer definierten Lebensdauer verursacht Umweltauswirkungen, die in einer Ökobilanz zu berücksichtigen sind. Beispielsweise kann der hohe Errichtungsaufwand eines Bauteils unter Umständen durch eine hohe Lebensdauer in der Gesamtbetrachtung kompensiert werden.

Die Nutzungsdauer von Bauteilen wird in der Regel für jeden Bauteiltyp aus einem Tabellenwert standardisiert eingegeben. Bei einer Ökobilanz im Rahmen einer Gebäudezertifizierung (z. B. BNB¹⁸⁹, DGNB¹⁹⁰) wird beispielsweise auf die Veröffentlichung „Lebensdauer von Bauteilen“ des

¹⁸⁷ Vgl. Häfliger et al. (2017)

¹⁸⁸ Vgl. Pohl (2016)

¹⁸⁹ BNB-Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen, <https://www.bnb-nachhaltigesbauen.de/bewertungssystem/bnb-aussenanlagen/bnb-aa-v2016/kriterien-bnb-aussenanlagen-von-bundesliegenschaften-bnb-aa.html>

BNB¹⁹¹ zurückgegriffen. Für technische Komponenten werden Angaben in der VDI 2067¹⁹² gemacht. Nach Befolgung der in diesen Quellen angegebenen Werte ergeben sich abhängig vom gewählten Baumaterial unterschiedliche Austauschhäufigkeiten von Bauteilen.

Da die Datenbasis für die Lebensdauer von Bauteilen nicht normiert ist und je nach Studie variiert, hat Hafner et al. (2016)¹⁹³ eine Übersicht für die in der Ökobilanzierung verwendeten Varianz der Lebensdauer je Bauteil aufgestellt.

Abbildung 65: Übersicht Varianz der Austauschzyklen für Bauteile

Table 3: Overview of number of replacement used in LCA calculations [6]

Construction component	number of replacement							
	30 years RSP		50 years RSP		80 years RSP		100 years RSP	
	min	max	min	max	min	max	min	max
external wall construction	0	0	0	0	0	0	0	0
external wall coating & cladding	0	3	0	5	0	9	0	12
exterior doors	0	2	1	3	1	6	2	8
exterior windows	0	1	0	1	0	3	0	3
internal wall construction	0	0	0	0	0	0	0	0
internal wall coating & cladding	1	1	2	3	3	5	4	6
interior door & coating	0	4	0	7	1	11	1	14
ceiling construction	0	0	0	0	0	0	0	0
ceiling coating & covering	0	3	0	5	0	9	0	12
roof construction	0	0	0	0	0	0	0	0
roof coating & covering	0	2	0	3	1	6	1	8

Quelle: Hafner et al. (2016), S. 439.

Dabei zeigt sich für die Bauteile Außenwandverkleidung, Deckenbelag, Oberflächen im Innenraum und Innentüren eine besonders hohe Varianz der Austauschzyklen.

Hafner et al. (2016) untersuchte den Einfluss des Betrachtungszeitraums und der Lebensdauer von Bauteilen für Ökobilanzen zu Holz- und Massivbauweisen mit dem Ergebnis, dass der Betrachtungszeitraum in Kombination mit der Lebensdauer besonders hohe Auswirkungen auf die Ergebnisse einer Ökobilanz hat.

Mit der Berücksichtigung der Module A1 bis A3, B4, C3 und C4 wurden für mehrere EFH und MFH in unterschiedlichen Bauweisen die Ergebnisse bei unterschiedlichen Betrachtungszeiträumen (30, 50, 80 und 100 Jahre) gegenübergestellt. Wie bereits beschrieben, wirkt sich dieser nur im Modul B aus. Der hohe Materialeinsatz in der Herstellungsphase sorgt u. a. beim Treibhauspotenzial für hohe Werte. In Abbildung 66 wird es relativ pro Jahr ausgewiesen, wodurch sich zeigt, dass die Module A, C und D nicht konstant sind, da diese nur einmalig stattfinden und sich ihr Einfluss bei einem zunehmenden Betrachtungszeitraum verringert.

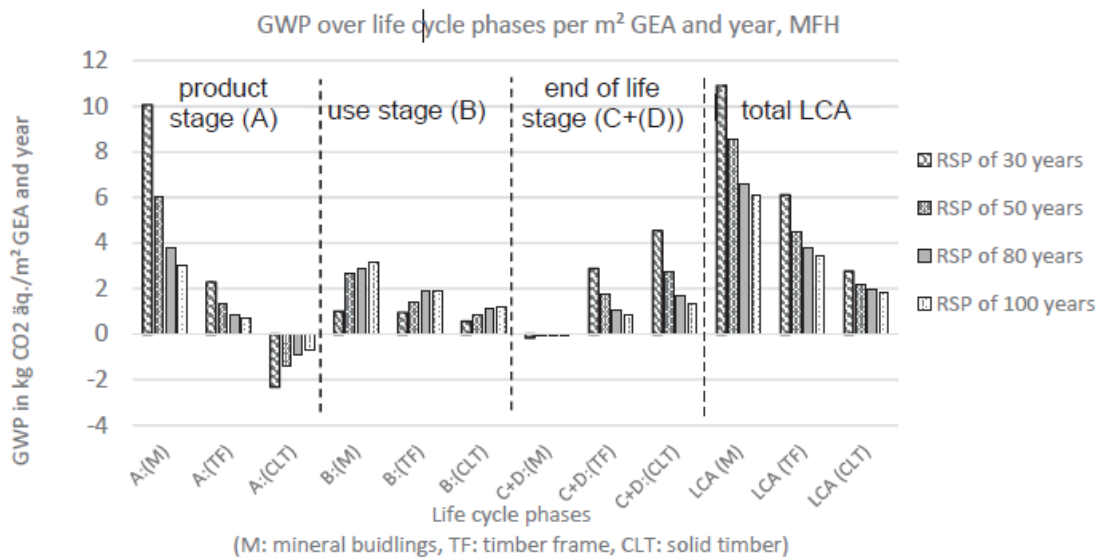
¹⁹⁰ DGNB-Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen, <https://www.dgnb.de/>

¹⁹¹ Siehe: <https://www.nachhaltigesbauen.de/baustoff-und-gebaeuedaten/nutzungsdauern-von-bauteilen.html>

¹⁹² Richtlinienreihe VDI 2067 - „Wirtschaftlichkeit gebäudetechnischer Anlagen“

¹⁹³ Hafner et al. (2016)

Abbildung 66: Einfluss des Betrachtungszeitraumes (RSP) auf die Lebenszyklusphasen für den Umweltindikator Treibhauspotenzial

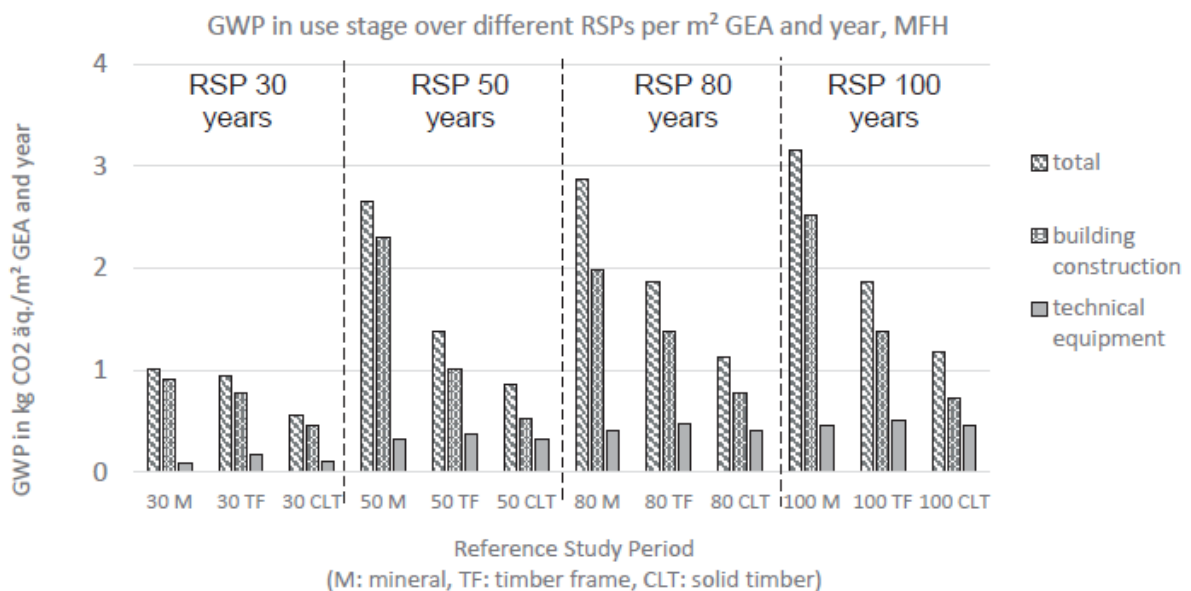


Quelle: Hafner et al. (2016), S. 439

Bei Gebäuden in Massivbauweise ist der Einfluss des Betrachtungszeitraums im Vergleich zu Holzbauweisen höher. Bei der Massivholzbauweise ist der Einfluss hingegen sehr gering. Die unterschiedlichen Effekte kommen durch die Unterschiede in der Nutzungsphase zustande.

Das folgende Diagramm zeigt, dass sich der Einfluss des Betrachtungszeitraums kaum auf die Gebäudetechnik auswirkt, sondern sich auf die Bauteile beschränkt.

Abbildung 67: Einfluss des Betrachtungszeitraums (BZR=RSP) auf die Baukonstruktion und Haustechnik für den Umweltindikator Treibhauspotenzial



Quelle: Hafner et al. (2016), S. 439

Die tatsächliche Dauerhaftigkeit von Bauteilen ist bei Gebäuden sehr unterschiedlich. Für WDVS wird beispielsweise von einer Lebensdauer von 40 Jahren ausgegangen. Diese können in Einzelfällen jedoch auch wesentlich länger haltbar sein. Eine Studie zu einem Abgleich von Erfahrungswerten aus der Praxis mit den Literaturwerten könnte den Einfluss der tatsächlichen Lebensdauer bestimmter Systeme weiter beleuchten. In Pohl (2017) wird darauf hingewiesen, dass in der aktuellen Version des Leitfadens Nachhaltiges Bauen von 2015 kein genauer Wert für Bauteile angegeben wird, die eine Nutzungsdauer größer 50 Jahre aufweisen. Da der Betrachtungszeitraum der Nachhaltigkeitszertifizierungssysteme (BNB und DGNB) 50 Jahren entspricht, sind Angaben zu längeren Lebensdauern nicht notwendig. Die Berechnungen von Pohl (2017) stützen sich aus diesem Grund auf die Nutzungsdauer von Bauteilen gemäß des Leitfadens Nachhaltiges Bauen von 2001, wo den relevanten Bauteilen eine Lebensdauer zugeordnet ist (z. B. Außenwand aus Weichholz, bekleidet: mittlere Lebenserwartung 70 Jahre, Betonaußenwand: mittlere Lebenserwartung 120 Jahre).¹⁹⁴ Um den Einfluss dieser Werte in die Ökobilanz einfließen zu lassen, wurde ein Betrachtungszeitraum von 80 Jahren gewählt, wodurch für die Holzkonstruktion, im Gegensatz zur Massivbauweise, ein kompletter Austausch erforderlich wird.

Im Ergebnis lässt sich feststellen, dass es kein einheitliches Vorgehen für die Wahl des Betrachtungszeitraums und der Nutzungsdauer der Bauteile gibt bzw. in den betrachteten Studien eine hohe Varianz vorhanden ist. Die Wahl der beiden Parameter kann das Ergebnis einer Ökobilanz jedoch maßgeblich verändern.

8.4.10 Dämmstoffe

Da Dämmstoffe unabhängig von der Bauweise (Massiv- bzw. Holzbau) eingesetzt werden können, kann in einem Vergleich, in dem für beide Bauweisen unterschiedliche Dämmstoffe eingesetzt werden, ermittelt werden, ob die Wahl der Dämmstoffe bei der Bewertung der günstigeren Bauweise relevant ist. In König (2017)¹⁹⁵ wurden Dämmstoffe aus nachwachsenden und synthetischen Rohstoffen für ein modelliertes Wohngebäude aus Kalksandstein und in Holzrahmenbauweise mit der Betrachtung der Lebenszyklusphasen Herstellung, Instandsetzung und Entsorgung (ohne Energieverbrauch in der Betriebsphase) verglichen. Als Energiestandard wurde das 15-kWh-Energieniveau gewählt, um durch die hohen Dämmstärken einen eindeutigen Unterschied zwischen den Dämmstoffen aufzeigen zu können.

Es wurden verschiedene Dämmmaterialvarianten je Bauweise erstellt:

Kalksandsteinbauweise:

- ▶ Basisvariante: Mix aus synthetischen Dämmstoffen (z. B. EPS, XPS, Mineralwolle) und nachwachsenden Dämmstoffen (z. B. Korkplatten, Zellulosedämmung und Holzfasерplatten)
- ▶ Ausschließlich synthetische Dämmstoffvariante
- ▶ Ausschließlich Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen

Holzrahmenbauweise:

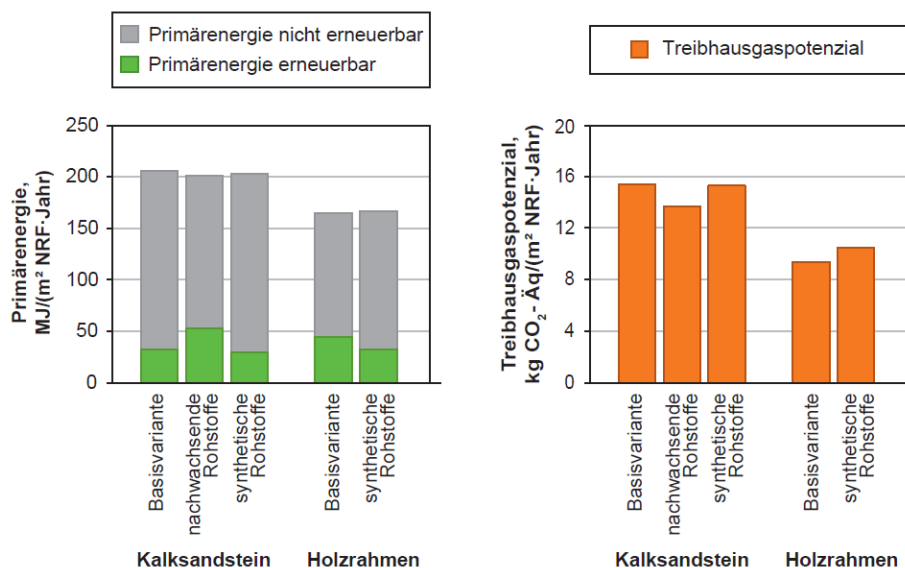
- ▶ Basisvariante: Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen
- ▶ Ausschließlich synthetische Dämmstoffvariante

¹⁹⁴ Vgl. Pohl (2017)

¹⁹⁵ Vgl. König (2017)

Das nachfolgende Diagramm zeigt den Vergleich der Varianten für die beiden Leitindikatoren Primärenergie und Treibhauspotenzial. Darin schneiden die Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen in den betrachteten Umweltauswirkungen für beide Bauweisen jeweils erwartungsgemäß am günstigsten ab. Es zeigt sich auch, dass die Unterschiede zwischen unterschiedlichen Dämmstoffen bei beiden Bauweisen, bezogen auf die Umweltauswirkungen des Gesamtgebäudes, vergleichsweise gering ausfallen.

Abbildung 68: Umweltindikatoren – Einfluss von nachwachsenden Dämmstoffen im Vergleich zu synthetischen Dämmstoffen



Quelle: Unger et al. (2018)¹⁹⁶

Für den Nebenindikator Überdüngungspotenzial zeigt die Variante mit nachwachsenden Rohstoffen etwas höhere Werte, wohingegen die Dämmvariante aus synthetischen Rohstoffen im Sommersmogpotenzial um den Faktor zwei bis fünf höher liegt.

8.4.11 Kellergeschoss

Für den Vergleich von Massiv- und Holzbauten ist der Aspekt, ob das Vergleichsgebäude ein Kellergeschoss besitzt von besonderer Bedeutung. Ein Keller beeinflusst den Anteil der Bauteile aus Holz maßgeblich und somit auch den Vorteil des Baustoffs in Bezug auf Umweltauswirkungen.¹⁹⁷

In der Studie von König (2017) wird im Rahmen von Ökobilanzierungen für Wohngebäude festgestellt, dass ein Gebäude *mit* im Vergleich zu einem Gebäude *ohne* Kellergeschoss allein durch den erhöhten Materialeinsatz absolut gesehen mehr Umweltauswirkungen verursacht. Durch die erhöhte Nutzfläche können diese jedoch in einem Vergleich der spezifischen Auswirkungen pro m² Nutzfläche wieder vollständig kompensiert werden.

In Hafner, Schäfer (2017) werden die Ökobilanzmodelle bewusst ohne Kellergeschoss erstellt, um den beschriebenen Einfluss auf das Ergebnis der Umweltauswirkungen ausklammern zu können. Der Anteil der mineralischen Baustoffe ist, wie in Kapitel 8.4.1 aufgezeigt, ohnehin relativ gering.

¹⁹⁶ Vgl. Unger et al. (2018)

¹⁹⁷ Vgl. König (2017)

8.4.12 Datenbanken

Die Durchführung einer Ökobilanz ist inzwischen zu einem anerkannten und verbreiteten Mittel zur Bewertung der ganzheitlichen ökologischen Auswirkungen eines Gebäudes geworden. Die methodische Durchführung ist jedoch nicht vollständig gesichert bzw. normiert, sodass Vergleiche zwischen einzelnen Ökobilanzen nicht ohne weiteres möglich sind. Im Wesentlichen liegt die Ursache in der Verwendung unterschiedlicher Systemgrenzen, betrachteter Lebenszyklusphasen, funktioneller Einheiten in der Datenbank und am Umgang mit dem EOL eines Bauteils. Die Normierungen durch die ISO 14040 und Standards für Bauprodukte in der EN 15804 geben einen Rahmen vor, der jedoch weiterhin einen gewissen Spielraum für Unterschiede in der methodischen Durchführung einer Ökobilanz bietet.

In Häfliger et al. (2017) wurde durch Variantenbildungen einer Ökobilanz der Einfluss der Wahl der Datenbank auf das Ergebnis der Umweltauswirkungen untersucht. Darin werden vier MFH betrachtet, die nach 2010 in der Schweiz errichtet wurden und einen hohen Energieeffizienzstandard aufweisen. Die Gebäude unterscheiden sich jeweils in der Größe, Geschossigkeit und den verwendeten Konstruktionsmaterialien. Zwei Gebäude sind in Massivbauweise aus Beton hergestellt, ein Gebäude stellt eine Mischung aus Holz- und Massivbauweise dar und bei einem Gebäude besteht die Konstruktion vollständig aus Holz.¹⁹⁸

Nach Anand, Amor (2017) kann grundsätzlich von drei unterschiedlichen Quellen zur Erstellung einer Ökobilanz ausgegangen werden.¹⁹⁹

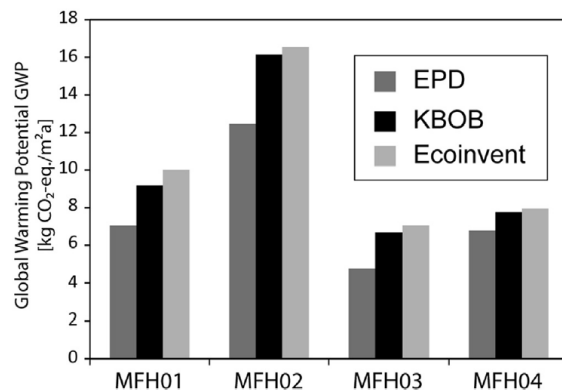
- ▶ Gebäude-Industrie (z. B. Ecoinvent V.2)
- ▶ Umweltdatenbanken (z. B. Swiss Catalogue Construction KBOB)
- ▶ Environmental Product Declaration (z. B. Umweltproduktdeklarationen, EPD)

Die Unterschiede dieser drei Quellen wurden in Häfliger et al. (2017) stellvertretend durch die in Klammer aufgeführten Datenbasen analysiert. Dazu wurden die Gebäude in den Lebenszyklusphasen A1 bis A3, B4, C1, C3 und C4 betrachtet, mit der funktionellen Einheit von 1 m² Nutzfläche und einem Betrachtungszeitraum von 60 Jahren. Die folgende Abbildung zeigt das Ergebnis der Sensitivitätsanalyse mit dem Einfluss der drei Datenbanken auf das spezifische Treibhauspotenzial der vier betrachteten Gebäude.

¹⁹⁸ Vgl. Häfliger et al. (2017)

¹⁹⁹ Vgl. Anand, Amor (2017)

Abbildung 69: Vergleich unterschiedlicher Datenbanken für den Umweltindikator Treibhauspotenzial für vier untersuchte Mehrfamilienhäuser in unterschiedlichen Bauweisen



- MFH01 – Massivbauweise
- MFH02 – Holz-Massivbau
- MFH03 – Holzbauweise
- MFH04 – Massivbauweise

Quelle: Häfliger et al., S. 808

Die Wahl der Datenbanken besitzt bei allen vier betrachteten Gebäuden eine ähnliche spezifische Abweichung. Bei der Verwendung des „Swiss Catalogue Construction KBOB“ und Ecoinvent als Datenbasis zeigen sich sehr ähnliche Ergebnisse (zwischen 0,2 und 0,9 kg CO₂/m²a Differenz), wohingegen bei der Verwendung von EPDs der Unterschied zu den anderen beiden Datenbanken ca. 20 % ausmacht. Zudem lässt sich erkennen, dass die Gestaltungsqualität demnach scheinbar einen höheren Einfluss auf das Ergebnis besitzt als der alleinige Faktor der Wahl des Baumaterials.

Bei der Betrachtung der Einflüsse unterschiedlicher Datenbanken auf Bauteilebene zeigt sich, dass die Unterschiede je nach Baumaterial sehr unterschiedlich sind. Bei zementbasierten Baustoffen ist die Auswirkung eher geringfügig, wohingegen bei Holzbaustoffen und Dämmmaterialien ein hoher Unterschied vorhanden sein kann. Die Unterschiede ergeben sich u. a. durch unterschiedliche Materialinputs in den EPDs, beispielsweise wird bei KBOB und Ecoinvent für Beton 12,6 % Zement angesetzt, wohingegen bei EPDs nur 4 % angesetzt werden. Zudem ist die Systemgrenze teilweise unterschiedlich. Beispielsweise berücksichtigen nur EPDs negative CO₂-Werte für anfallendes Sägemehl bei der Holzproduktion.

Datenmodule der ÖKOBAUDAT

Die ÖKOBAUDAT ist in Deutschland die verbreitetste Datenbank und für die Nachhaltigkeitszertifizierungssysteme DGNB und BNB bindend. Die Datenmodule der ÖKOBAUDAT besitzen unterschiedliche Datensätze. Es ist zwischen den folgenden Herkunftsquellen zu unterscheiden:

- ▶ Generisch – aus unterschiedlichen Quellen erhobene Datensätze mit Malusaufschlag
- ▶ Repräsentativ – durchschnittlicher Datensatz ausgewählter Hersteller
- ▶ Durchschnitt – Durchschnittsdatsatz einer Herstellergruppe
- ▶ Spezifisch – Datensatz eines Herstellers

Die ÖKOBAUDAT hat in den letzten zehn Jahren eine Entwicklung in den Anteilen der Herkunftsquellen vollzogen, womit sich fortlaufend die Genauigkeit zur Widerspiegelung der tatsächlich verwendeten Baumaterialien durch die stellvertretenden Datensätze ergeben soll. 2009 bestand die Datenbank nahezu ausschließlich aus generischen Datensätzen. Inzwischen gibt es zunehmend EPDs, die von Verbänden und Herstellern der Bauprodukte erstellt werden.²⁰⁰

König (2017) hat als Beispiel zur Verdeutlichung der sich ergebenden Unterschiede durch verschiedene Herkunftsquellen zwei Datensätze für Beton verglichen:

- 1.4.01 Transportbeton (2015), generisch
- Beton C 20/205 (de, 2016), Durchschnitt

Bei der Betrachtung des Indikators Primärenergie nicht erneuerbar (Lebenszyklusphasenmodule A bis C) schneidet der Durchschnittsdatsatz 23 % günstiger ab. Hauptursache liegt in dem aufgeschlagenen Malus von 10 %, da er nicht für ein spezifisches Produkt eines Herstellers gilt. Beim Indikator Treibhauspotenzial gilt die gleiche Tendenz.

Ähnliche Abweichungen ergeben sich für den Vergleich des generischen Datensatzes aus der ÖKOBAUDAT mit der EPD für Baustahl in Primärenergie und Treibhauspotenzial ca. 20 %.²⁰¹

8.5 Zusammenfassung zum Arbeitspaket 2: Vergleichende Ökobilanzen von Holz- und Massivhäusern

Die betrachteten Studien, die einen ökologischen Vergleich unterschiedlicher Bauweisen durch eine Ökobilanz anstellen, zeigen aufgrund der nicht durchgehenden Anwendung von Normen eine hohe Varianz in der Definition der Systemgrenze, der Methodik der Ökobilanz und des Betrachtungszeitraums. Dies führt zu einer sehr hohen Varianz in den Ergebnissen der Umweltauswirkungen für die Holz- und Massivbauweise und dadurch auch in der Höhe des Substitutionspotenzials des Baustoffs Holz. Dies verdeutlicht, dass weiterer Forschungsbedarf besteht und eine einheitliche Anwendung von Standards für eine transparente, vergleichbare Erstellung einer Ökobilanz erforderlich ist.

Infolgedessen kann ein Vergleich zwischen den Bauweisen nur innerhalb einer Studie stattfinden. Übergreifend wurde deswegen ausgewertet, wie die Holz- relativ zur Massivbauweise je Studie und betrachtetem Umweltindikator abschneidet.

Für die beiden Indikatoren Primärenergiebedarf und Treibhauspotenzial zeigt sich, dass in allen betrachteten Studien, ausgenommen einer Studienreihe (Graubner et al. (2008 und 2013) und Pohl (2017), grundsätzlich die Holzbauweise, unabhängig von den gewählten Baustoffen für die Massivbauweise und Konstruktionsart in der Holzbauweise, geringere Umweltauswirkungen in den betrachteten Leitindikatoren vorweisen kann. Dies gilt sowohl bei Betrachtung der Systemgrenze Herstellung (Modul A) als auch bei der Systemgrenze Herstellung bis Entsorgung (Module A bis C).

Für ein Gebäude, das die heutigen EnEV-2014-Anforderungen erfüllt, wird in der Regel davon ausgegangen, dass die Konstruktion 30 % der gesamten Umweltauswirkungen über den Gebäudelebenszyklus ausmacht und somit der Großteil in der Lebenszyklusphase Nutzung im Energieverbrauch liegt. In König (2017) wurde bei einem 15-kWh-Energieniveau-Gebäude ein Anteil der Konstruktion im Bereich von 70 % festgestellt. Dies verdeutlicht, dass künftig bei höheren

²⁰⁰ Vgl. König (2017)

²⁰¹ Vgl. bauforumstahl, Umwelt-Produktdeklaration Baustähle Einfache Beispiele zur Anwendung

Energiestandards Verbesserungen der Ökobilanz vor allem durch die Bauweisen erzielt werden können, die materialeffizient und mit geringeren Umweltbelastungen umgesetzt werden.

Nach dem Energieverbrauch in der Nutzungsphase ist vor allem die Herstellungsphase die Lebenszyklusphase mit den höchsten Umweltauswirkungen, die Entsorgungsphase spielt anteilig eine untergeordnete Rolle.

Der Lebenszyklusphasenabschnitt Modul D (Gutschriften und Lasten außerhalb der Systemgrenze) behandelt Umweltauswirkungen und Gutschriften, die sich aus dem Wiederverwendungs-, Rückgewinnungs- und Recyclingpotenzial ergeben. Nach DIN EN ISO 14044 sind diese im Rahmen der Erstellung einer Ökobilanz lediglich informativ auszuweisen. Für die einzelnen Baustoffgruppen und die Betrachtung des Gesamtsystems Gebäude können sich große Unterschiede hinsichtlich des Potenzials der Gutschriften ergeben. Daher hat die Addition des Moduls D zum Gesamtergebnis der Umweltauswirkungen über alle Lebenszyklusphasen, wie es in einigen Studien (die keinen Normbezug aufweisen) durchgeführt wurde, einen sehr hohen Einfluss.

Vor allem bei einem Vergleich zwischen unterschiedlichen Produkten bzw. Bauweisen führt die Anrechnung von Potenzialen des Baustoffs Holz zu großen Veränderungen in den Ergebnissen zu den Umweltauswirkungen. In Modul D besteht daher noch weiterer Forschungsbedarf zum künftigen Umgang mit diesem Aspekt. Bei der Berücksichtigung der Nutzung des Energieinhalts von Holz bei der Verbrennung ergeben sich bei einer nicht normkonformen Bilanzierung über die Module A bis D im Vergleich zur Massivbauweise wesentlich geringere oder gar positive Umweltauswirkungen (negatives Vorzeichen). Gleiches gilt bei der Berücksichtigung des Aspektes, dass unter den Rahmenbedingungen nachhaltig bewirtschafteter Waldflächen, wie sie in Mitteleuropa bestehen, jeder genutzte Stamm Platz für nachwachsende Bäume erzeugt und folglich den Kohlenstoffspeicher vermehrt.

Darüber hinaus wurden die entscheidenden Parameter, die eine Ökobilanz maßgeblich beeinflussen, in einer Vielzahl von Studien identifiziert. Dazu wurden Sensitivitätsanalysen durchgeführt, um zu klären, welche Aspekte bei einem Vergleich der Bauweisen besonders wichtig sind. Dazu zählen vor allem die Wahl des Betrachtungszeitraums in Kombination mit der angesetzten Lebensdauer von Bauteilen, der Anteil der Holzbaustoffe bei einem Holzgebäude, die verwendete Datenbank, der Gebäudetyp, der Gebäudestandort und die berücksichtigten Lebenszyklusphasen.

9 Quellenverzeichnis

9.1 Quellenverzeichnis zu AP 1.1

- Becker, K.; Radovic, B. (2018): INFORMATIONSDIENST HOLZ spezial April 2018: Baustoffe für den konstruktiven Holzbau. Informationsverein Holz e.V. [Hrsg.], 4. Überarbeitete Auflage 2018, Düsseldorf. pdf-Dokument.
- BMEL (2017): Klima schützen. Werte schaffen. Ressourcen effizient nutzen. Charta für Holz 2.0. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2. Auflage Dezember 2017, Berlin
- GIN - Gütegemeinschaft Nagelplattenprodukte e.V. Interessenverband Nagelplatten e.V. [Hrsg.]: INFORMATIONSDIENST HOLZ: holzbau handbuch Reihe 2: Tragwerksplanung, Teil 1: Allgemeines, Folge 3: Nagelplattenkonstruktionen nach Eurocode. Informationsverein Holz e.V., 2017, Düsseldorf. pdf-Dokument
- Kaufmann, H.; Krötsch, S., Winter, S. (2017): Atlas Mehrgeschossiger Holzbau. 1. Auflage, 2017, Edition DETAIL, München
- Mantau, U.; Döring, P., Hiller, D. (2013): Holzeinsatz im Bauwesen – Verbindungsstrukturen nach Gebäuden und Gewerken. In: Weimar, H.; Jochem, D. [Hrsg.]: Holzverwendung im Bauwesen – Ein Projekt der „Charta für Holz“ – Hamburg 2013 (Thünen Report 9, Artikel 1)
- Müller, A. (2018): Workshop A1: Hybridbauweise 2.0 – Neue Wege im Holz- und Hybridbau. Fachtagung eco-Bau, NNBS: Innovative Bauweisen, 15.03.2018, Zürich
- Scheer, C., Kubowitz, P. (2005): Baukonstruktionen II – Holzbau, Skript zur Vorlesung an der Technischen Universität Berlin. 11. Auflage, Oktober 2005. Vorlesungsskript, Berlin, nicht veröffentlicht
- Pohl, S. (2017): Betrachtungen zur Nachhaltigkeitsqualität der Holzbauweise im Wohnungsbau. LCEE-Studie für die Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau. Life Cycle Engineering Experts GmbH. Darmstadt 2017
- Torno, S. et. al. (2017): INFORMATIONSDIENST HOLZ spezial November 2017: Konstruktive Bauprodukte aus europäischen Laubhölzern. Informationsverein Holz e.V. [Hrsg.], 2017, Düsseldorf. pdf-Dokument.
- Von Halász, R.; Scheer, C. [Hrsg.] (1996): Holzbau-Taschenbuch, Band 1: Grundlagen, Entwurf, Bemessung und Konstruktionen. 9. Auflage, 1996, Verlag Ernst und Sohn, Berlin
- Schmidt, M.; Knorz, M., Torno, S.: Bauen mit Laubholz – Mehr als nur für den Innenausbau tauglich: Aktuelle Forschungsergebnisse bringen Laubholz in das Tragwerk zurück. In: LWF aktuell 98/2014, S. 37-39. Bayerische Landesanstalt für Wald- und Forstwirtschaft [Hrsg.], WALD-WISSENSCHAFT-PRAXIS
- Statistisches Bundesamt (2018): Fachserie 5 Reihe 1, Bautätigkeit und Wohnungen, Bautätigkeit, 2017, erschienen 11.06.2018, Artikelnr. 2050100177004, Statistisches Bundesamt (Destatis), 2018, verfügbar unter: <https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/Bauen/BautaetigkeitWohnungsbau/Bautaetigkeit.html>
- Hess Timber Limitless (2018): Firmenwebsite. <http://www.hess-timber.com/> (Zugriffsdatum 11.08.2018)
- Holz Leipold - Zimmerei, Sägewerk und Holzhandel (2018): Firmenwebsite. <http://www.holz-leipold.de> (Zugriffsdatum 10.08.2018)
- MAX-HOLZ Systemtechnik GmbH (2018): Firmenwebsite <https://max-holz.com/nagelplattenbinder/> (Zugriffsdatum 16.07.2018)
- Mühlbauer Holz GmbH (2018): Firmenwebsite, Kategorie Produkte, Schnittholz http://www.muehlbauerholz.com/frames/de/download/pdf/holz_schnittholz.pdf (Zugriffsdatum 10.08.2018)
- Pollmeier (2018): Firmenwebsite. <https://www.pollmeier.com/de/> (Zugriffsdatum 16.07.2018)

Reumann: Holzbau, Zimmerei, Meisterbetrieb (2018): Firmenwebsite. <http://www.zimmerei-reumann.at/> (Zugriffsdatum 10.08.2018)

Wald-Prinz (2018): Wald kaufen & verkaufen, Website, Kategorie Holzhandel. <http://www.wald-prinz.de/holzpreise-und-holzpreisentwicklung-fichte/383> (Zugriffsdatum 29.10.2018)

DIN EN 1912:2013-10: Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen – Zuordnung von visuellen Sortierklassen und Holzarten; Deutsche Fassung EN 1912:2012 + AC:2013

9.2 Quellenverzeichnis zu AP 1.2 bis 1.4

BMEL [Hrsg.] (2016a): Der Wald in Deutschland. Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.

https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Bundeswaldinventur3.pdf?__blob=publicationFile (Zugriffsdatum 12.10.2018)

BMEL [Hrsg.] (2016b): Wald- und Rohholzpotenzial der nächsten 40 Jahre. Ausgewählte Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2013 bis 2052. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Wald-Rohholzpotenzial-40Jahre.pdf?__blob=publicationFile (Zugriffsdatum 12.10.2018)

BMEL [Hrsg.] (2017a): Ergebnisse der Waldentwicklungs- und Holzaufkommensmodellierung 2012. Stand Dezember 2017. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft.

https://www.bmel.de/SharedDocs/Downloads/Broschueren/Waldentwicklung2012.pdf?__blob=publicationFile (Zugriffsdatum 12.10.2018)

BMEL (2017b): Klima schützen. Werte schaffen. Ressourcen effizient nutzen. Charta für Holz 2.0. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft, 2. Auflage Dezember 2017, Berlin

Böttcher, H.; Hennenberg, K.; Winger, C. (2018): Waldvision Deutschland, Beschreibung von Methoden, Annahmen und Ergebnissen. Öko-Institut e.V. <https://waldvision.de/index-4.html#> (Zugriffsdatum 12.10.2018)

DIW [Hrsg.] (2017): Strukturdaten zur Produktion und Beschäftigung im Baugewerbe – Berechnungen für das Jahr 2016. Kurzfassung. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung, Berlin 2017.

http://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bauwirtschaft/strukturdaten_bau_studie_kurz_bf.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

Döring, P.; Glasenapp, S.; Mantau, U. (2017): Regionale Derbholzverwendung und Vergleich zum WEHAM-Derbholzpotenzial. Abschlussbericht zum Teilvorhaben des Verbundforschungsprojekts WEHAM-Szenarien (AP 3.2), Hamburg, 2017. https://www.weham-szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/Regionale_Derbholzverwendung_und_Vergleich_zum_WEHAM-Derbholzpotenzial.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

FNR [Hrsg.] (2018a): Basisdaten Biobasierte Produkte 2018. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). https://www.fnr.de/fileadmin/allgemein/pdf/broschueren/Basisdaten_biobasierte_Produkte-2018_web.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

FNR [Hrsg.] (2018b): Rohstoffmonitoring Holz, Erwartungen und Möglichkeiten. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR). <https://mediathek.fnr.de/broschuren/nachwachsende-rohstoffe/holz/rohstoffmonitoring-holz-erwartungen-und-moeglichkeiten.html> (Zugriffsdatum 12.10.2018)

FSC [Hrsg.] (2018): Facts and Figures June 2018. Forest Stewardship Council, verfügbar unter: <https://ic.fsc.org/en/facts-and-figures> (Zugriffsdatum 12.10.2018)

Hafner, A.; Rüter, S.; Ebert, S.; Schäfer, S.; König, H.; Cristofaro, L.; Diedrichs, S.; Kleinhenz, M.; Krechel, M (2017): Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau). Forschungsprojekt 28W-B-3-054-01 Waldklima-

fonds, BMEL/BMUB. ISBN: 978-3-00-055101-7.

https://www.hb.bgu.tum.de/fileadmin/w00bpc/www/Forschung/Abgeschlossene/2017/THG_Bericht-final.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

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, 2015, 134(5), Springer-Verlag, Heidelberg, S. 869-888.

Mantau, U.; Döring, P.; Hiller, D. (2013): Holzeinsatz im Bauwesen – Verwendungsstrukturen nach Gebäuden und Gewerken. In: Weimar, H.; Jochem, D. [Hrsg.]: Holzverwendung im Bauwesen – Ein Projekt der „Charta für Holz“. Hamburg 2013 (Thünen Report 9, Artikel 1). https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-report/Thuenen_Report_09.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

Mantau, U.; Döring, P.; Glasenapp, S.; Blanke, C. (2017): Szenarien der stofflichen und energetischen Holzverwendung, In: AFZ-DerWald, 2017, Ausgabe 13. https://www.weham-szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/AFZ_13_17_3_Szenarien_der_stofflichen_und_energetischen_Holzverwendung.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

Oehmichen, K.; Röhling, S.; Dunger, K.; Gerber, K.; Klatt, S. (2017): Ergebnisse und Bewertung der alternativen WEHAM-Szenarien. In: AFZ-DerWald, 2017, Ausgabe 13. https://www.weham-szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/AFZ_13_17_2_Ergebnisse_und_Bewertung_der_alternativen_WEHAM-Szenarien.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

PEFC [Hrsg.] (2017): PEFC Global Statistics: SFM & CoC Certification, Data: December 2017. PEFC International, Verfügbar unter: https://www.pefc.org/images/documents/PEFC_Global_Certificates_-_Dec_2017.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

Pohl, S. (2017): Betrachtungen zur Nachhaltigkeitsqualität der Holzbauweise im Wohnungsbau. LCEE-Studie für die Deutsche Gesellschaft für Mauerwerks- und Wohnungsbau. Life Cycle Engineering Experts GmbH, Darmstadt 2017. https://www.dgfm.de/uploads/media/2017-10-26-Studie_NH_Holzbau_gesamt-final-SP.PDF (Zugriffsdatum 12.10.2018)

Seintsch, B. et al. (2017): Das WEHAM-Szenarien-Verbundforschungsprojekt. In: AFZ-Der Wald, 2017, Ausgabe 13. https://www.weham-szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/AFZ_13_17_1_Das_WEHAM-Szenarien-Verbundforschungsprojekt_im_Ueberblick.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

Schier, F., Weimar H. (2017): Modellierung des Holzmarkts im WEHAM-Projekt In: AFZ-Der Wald, 2017, Ausgabe 13. https://www.weham-szenarien.de/fileadmin/weham/Ergebnisse/AFZ_13_17_4_Modellierung_des_Holzmarktes_im_WEHAM-Projekt.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

Schier, F.; Weimar H. (2018): Holzmarktmodellierung – Szenarienbasierte Folgenabschätzung verschiedener Rohholzangebotssituationen für den Sektor Forst und Holz. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Working Paper 91, DOI: 10.3220/WP1523005251000. https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper_91.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

Statistisches Bundesamt (2017): Statistisches Jahrbuch 2017, Internationales, Wiesbaden 2017. https://www.destatis.de/DE/Publikationen/StatistischesJahrbuch/StatistischesJahrbuch2017.pdf?__blob=publicationFile (Zugriffsdatum 12.10.2018)

Statistisches Bundesamt (2018): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Forstwirtschaftliche Bodennutzung – Holzeinschlagsstatistik, Wiesbaden 2017, verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/WaldundHolz/Holzeinschlag2030331177004.pdf?__blob=publicationFile (Zugriffsdatum 12.10.2018)

Thünen-Institut [Hrsg.] (2018): Holzeinschlag und Rohholzverwendung. <https://www.thuenen.de/de/wf/zahlen-fakten/produktion-und-verwendung/holzeinschlag-und-rohholzverwendung/> (Zugriffsdatum 12.10.2018)

TUM (2015): Konkurrenz um Holz: Ökologische, soziale und ökonomische Effekte der stofflichen und energetischen Verwertung von Holz. Teil A: Kurzbericht für das Bayerische Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten, den Verband Bayerischer Papierfabriken und die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe. Technische Universität München.

Weimar, H. (2016): Holzbilanzen 2013 bis 2015 für die Bundesrepublik Deutschland. Hamburg: Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Working Paper 57, DOI:10.3220/WP1463058733000. https://www.thuenen.de/media/publikationen/thuenen-workingpaper/ThuenenWorkingPaper_57.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

Zukunft Holz GmbH [Hrsg.] (2012): Holz-Journal, 2012, Ausgabe 11, Berlin. http://franzjosefadrian.com/wp-content/uploads/2015/09/2012_11_HoJo.pdf (Zugriffsdatum 12.10.2018)

9.3 Quellenverzeichnis zu AP 1.5

Die Bundesregierung. (2012). Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen – Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.02.2012. Berlin: BMU - Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Domont, P. (2001): Ohne Gebirgswald keine Musik. In: Nachhaltiger Tourismus dank nachhaltiger Waldbewirtschaftung im Bergwald. Informationsmappe zum Internationalen Tag des Waldes, Birmensdorf: Silviva [Hrsg.], S. 21-24

Fehrenbach, H., Köppen, S., Kauertz, B., Detzel, A., Wellenreuter, F., Breitmayer, E., Essel, R., Carus, M., Kay, S., Wern, B., Baur, F., Bienge, K., von Geibler, J. (2017): BIOMASSEKASKADEN. Mehr Ressourceneffizienz durch stoffliche Kaskadennutzung von Biomasse – Von der Theorie zur Praxis, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit, Forschungskennzahl 3713 44 100 UBA-FB-00., S.54

Fischer, S., Härtl, F., Wilnhammer, M., Lubenau, C. und Weber-Blaschke, G.: Effects of increasing wood energy consumption on global warming potential, primary energy demand and particulate matter emissions on regional level based on case study area Bavaria (Southeast Germany). Biomass and Bioenergy (81), S. 190-201

FNR [Hrsg.] (2018): Rohstoffmonitoring Holz, Erwartungen und Möglichkeiten. Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR).

Gärtner, S., Hienz, G., Keller, H., Müller-Lindenlauf, M. (2014): Gesamtökologische Bewertung der Kaskadennutzung von Holz- Umweltauswirkungen stofflicher und energetischer Holznutzungssysteme im Vergleich. IFEU Heidelberg, 2013

Höglmeier, K., Weber-Blaschke, G., Richter, K. (2016): Kaskadennutzung von Altholz in Bayern. mengenpotentiale aus dem Gebäudebestand und ökologische Bewertung. LWF-aktuell 2/2016. verfügbar unter: <https://www.lwf.bayern.de/forsttechnik-holz/holzverwendung/134351/index.php> (Zugriffsdatum 16.10.2019)

Lißner, K., Rug, W., Steinmetz, D. (2007): DIN 1052:2004 – Neue Grundlagen für Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken. Teil1: Material- und Werkstoffverhalten. Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin · Bautechnik 84 (2007), Heft 8

Ludwig, G., Gawel, E., Pannicke, N. (2016): Kaskadennutzung von Holz: Bestandaufnahme, Rechtsrahmen und Reformvorschläge für die Altholzverwertung in Deutschland. Factsheet der Arbeitsgruppe „Governance der Bioökonomie“. Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung

Knauf, M. (2017): Altholz stofflich nutzen oder thermisch verwerten? Holz-Zentralblatt Nr. 32 S. 755

Risse, M., Weber-Blaschke, G., Richter, K. (2017): Resource efficiency of multifunctional wood cascade chains using LCA and exergy analysis, exemplified by a case study for Germany, *Resources, Conservation & Recycling* 126, 141-152. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.07.045>.

Weber-Blaschke, G., Lubenau, C., Wilnhammer, M., Härtl, F., Friedrich, S., Hammerl, R., Helm, S., Helm, D., Borchert, H., Wittkopf, S., Knoke, T., Richter, K., (2015): Konkurrenz um Holz: Ökologische, soziale und ökonomische Effekte der stofflichen und energetischen Verwertung von Holz. Abschlussbericht der Technischen Universität München, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf und Bayerischen Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft, Freising. Kurzfassung, 36 S.

9.4 Quellenverzeichnis zu AP 1.6 und 1.7

BMEL Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft [Hrsg.] (2014): Der Wald in Deutschland – Ausgewählte Ergebnisse der dritten Bundeswaldinventur. 2014

BMEL Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft [Hrsg.] (2017): Klima schützen. Werte schaffen. Ressourcen effizient nutzen. – Charta für Holz 2.0. 2017

BMEL Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (2018): https://www.bmel.de/DE/Laendliche-Raeume/04_Flaechennutzung/flaechen_node.html (Zugriffsdatum 01.11.2018)

BMJV Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz (2009): Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz – WHG), verfügbar unter: http://www.gesetze-im-internet.de/whg_2009/WHG.pdf (Zugriffsdatum 01.11.2018)

BMU Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (2007): Nationale Strategie zur Biologischen Vielfalt. Kabinettsbeschluss vom 7. November 2007. (Neuaufgabe 2015 durch BMUB – Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit.)

BfN Bundesamt für Naturschutz [Hrsg.] (2014): Grünland-Report – Alles im Grünen Bereich?, 2014.

Bundesregierung (2017): Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Neuaufgabe 2016. S. 158.

Bundeswaldinventur (2018): <https://www.bundeswaldinventur.de/dritte-bundeswaldinventur-2012/waldland-deutschland-waldflaeche-konstant/> (Zugriffsdatum 25.10.2018)

LMBV Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau. Verwaltungsgesellschaft mbH Unternehmenskommunikation [Hrsg.] (2009): Rekultivierung von Bergbaufolgelandschaften – Nachhaltige Bergbausanierung. 2009.01/2009. Senftenberg

Hafner, A., Rüter, S., Ebert, S., Schäfer, S., König, H., Christofaro, L., Diederichs, S., Kleinhenz, M., Krechel, M. (2017) Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau). 148 S. Forschungsprojekt:28W-B-3-054-01 Waldklimafonds. BMEL/BMUB. ISBN: 978-3-00-055101-7

Rüter, S., Rock, J., Köthke, M. und Diter, M. (2011): Wie viel Holznutzung ist gut fürs Klima? – CO2 Bilanzen unterschiedlicher Nutzungsszenarien 2013 bis 2020. *AFZ-Der Wald*, 15/2011

Statistisches Bundesamt (2017a): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodenfläche nach Art der tatsächlichen Nutzung, Fachserie 3 Reihe 5.1, Wiesbaden 2017, verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Flaechennutzung/Bodenflaechennutzung2030510167004.pdf;jsessionid=9FD0093C6D714D86A37DDAAA2C1C4604.InternetLive1?__blob=publicationFile (Zugriffsdatum 25.10.2018)

Statistisches Bundesamt (2017b): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodennutzung der Betriebe (Struktur der Bodennutzung), Wiesbaden 2017, verfügbar unter:

https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Bodennutzung/Bodennutzung2030212177004.pdf?__blob=publicationFile (Zugriffsdatum 25.10.2018)

Statistisches Bundesamt (2017c): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodennutzung der Betriebe (Landwirtschaftlich genutzte Fläche), Fachserie 3 Reihe 3.1.2, Wiesbaden 2017, verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/Bodennutzung/LandwirtschaftlicheNutzflaeche2030312177004.pdf?__blob=publicationFile (Zugriffsdatum 25.10.2018)

Statistisches Bundesamt (2018): Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Forstwirtschaftliche Bodennutzung – Holzeinschlagsstatistik, Wiesbaden 2017, verfügbar unter: https://www.destatis.de/DE/Publikationen/Thematisch/LandForstwirtschaft/WaldundHolz/Holzeinschlag2030331177004.pdf?__blob=publicationFile (Zugriffsdatum 25.10.2018)

UBA Umweltbundesamt [Hrsg.] (2016): Umweltschutz, Wald und nachhaltige Holznutzung in Deutschland. Hintergrund, April 2016.

UBA Umweltbundesamt [Hrsg.] (2017): Daten zur Umwelt 2017 – Indikatorenbericht, 2017.

UBA Umweltbundesamt (2018a): <https://www.umweltbundesamt.de/themen/boden-landwirtschaft/flaechensparen-boeden-landschaften-erhalten>. (Zugriffsdatum 28.10.2018)

UBA Umweltbundesamt (2018b): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/flaeche/struktur-der-flaechennutzung>. (Zugriffsdatum 28.10.2018)

UBA Umweltbundesamt (2018c): <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/landbedeckung-landnutzung>. (Zugriffsdatum 28.10.2018)

UBA Umweltbundesamt [Hrsg.] (2018d): Umwelt und Landwirtschaft 2018.

Weimar, Holger und Jochem, Dominik [Hrsg.] (2009): Holzverwendung im Bauwesen – Eine Marktstudie im Rahmen der „Charta für Holz“. Thünen Report 9, 2009

9.5 Quellenverzeichnis zu AP 2

Albrecht, S.; Rüter, S.; Welling, J.; Knauf, M.; Mantau, U.; Braune, A.; Baitz, M.; Weimar, H.; Sörgel, S.; Kreissig, J.; Deimling, J.; Hellwig, S. (2008): ÖkoPot – Ökologische Potenziale durch Holznutzung gezielt fördern. Abschlussbericht zum BMBF-Projekt FKZ 0330645, Stuttgart, 298 S.

Achenbach, H.; Rüter, S. (2016): Ökobilanz-Daten für die Erstellung von Fertighäusern. Johann Heinrich von Thünen-Institut.

Adalberth, K. (2000): Energy use and environmental impact of new residential buildings. Ph.D. dissertation, Department of Building Physics, Lund University, Lund, Sweden.

Anand, C.; Amor, B. (2017): Recent developments, future challenges and new research directions in LCA of buildings: a critical review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 67, 408e416.

Bodemer, E.; Kleinhenz, M.; Winter, S.: (2017): HOMERA Gesundheitliche Interaktion von Holz - Mensch – Raum, Abschlussbericht DBU-Aktenzeichen 33277-25, Technische Universität München Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion.

Botasso, A. (2014): Meta-analysis application for assessing life cycle impacts in the building sector, Universidade De Sao Paulo.

Binz A., Erb M., Lehmann G. (2000): Ökologische Nachhaltigkeit im Wohnungsbau; eine Bewertung von Erneuerungsstrategie. Muttenz: Fachhochschule beider Basel.

Bischof, S.; Lunk, P.; Stüssi, U. (2010): Vergleichende Ökobilanz, in: Tec21 Band 136 (2010) Heft 24 Recycling-Beton

- Börjesson, P.; Gustavsson, L. (1999): Greenhousegas gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives. In: Energy Policy.
- Cole, R.J.; Kernan P.C. (1996); Life-cycle energy use in office buildings. Building and Environment; 31(4):307-17.
- Gerilla, G.P.; Teknomo, K.; Hokao, K. (2007): An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction. In: Building and Environment.
- Graubner, C.-A.; Knauff, A. (2008): Ökobilanzstudie – Gegenüberstellung Massivhaus /Holzelementbauweise an einem KfW Energiesparhaus 40. In: Forschungsbericht F04-8-2008. Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau - Fachgebiet Massivbau.
- Graubner, C.-A.; Pohl, S. (2013) Nachhaltigkeit von Ein- und Zweifamilienhäusern aus Mauerwerk. Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau - Fachgebiet Massivbau.
- Guardigli, L.; Monari, F.; Bragadin, M. A. (2011): Assessing Environmental Impact of Green Buildings through LCA Methods: A comparison between Reinforced Concrete and Wood Structures in the European Context. In: Procedia Engineering.
- Gugerli, H.; Lenel, S.; Sintzel, B. (2015): Gesund und ökologisch bauen mit Minergie-Eco, Fachhochschule Nordwestschweiz, Institut Energie am Bau.
- Gustafsson, L.; Joelsson, A.; Sathre, R. (2010): Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building. In: Energy and Buildings.
- Gustavsson, L.; Sathre, R. (2006): Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials. In: Building and Environment.
- Hafner, A.; Schäfer, S. (2017): Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level. In: Journal of Cleaner Production, Elsevier Ltd.
- Hafner A.; Rüter S.; Ebert S.; Schäfer S.; König H.; Cristofaro L.; Diederichs S.; Kleinhenz M.; Krechel M. (2017): Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden - Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau).
- Hafner, A.; Schäfer, S.; Krause, K. (2016): Effects of different reference study periods of timber and mineral buildings on material input and global warming potential Sustainable Built Environment Conference 2016 in Hamburg, S.438 ff.
- Häfliger, I.-F.; John, V.; Passer, A.; Lasvaux, S.; Hoxha, E.; Ruschi Mendes Saade, M.; Habert, G. (2017): Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials. In: Journal of Cleaner Production, Elsevier Ltd.
- Holger, K.; Kaufmann, H. (2015): Aktiver Klimaschutz durch Ressourceneffizienz und Nachwuchspotenzial des Holzbaus am Beispiel von zwei Neubauten und drei Sanierungsprojekten – Abschlussbericht. Deutsche Bundesstiftung Umwelt.
- Kellenberger, D.; Althaus, H.-J. (2008): Relevance of simplifications in LCA of building components. In: Building and Environment, Elseier Ltd.
- König, H. (2017): Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden - Lebenszyklusanalyse mit Berechnung der Ökobilanz und Lebenszykluskosten. Bayerisches Landesamt für Umwelt und Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie und Technologie.
- König, H.; Kauffmann, H.; Lattke, F. (2011): Bauen mit Holz als aktiver Klimaschutz. Deutsche Bundesstiftung Umwelt.
- Krötsch, S.: Holz – nachhaltiger Baustoff mit Zukunft (2018), Generiert durch Eidgenössische Technische Hochschule.

Loewe, K.; Albrecht, S.; Wittstock, B.; Fischer, M.; Sedlbauer, K. (2010): Anforderungen an den Ökobilanziellen Vergleich verschiedener Bauweisen am Beispiel 1-2 Familienhaus. BauSim.

Müller, D.; Eichenberger, M.; Stenz, M. (2015): Holzbau vs. Massivbau – ein umfassender Vergleich zweier Bauweisen im Zusammenhang mit dem SNBS Standard. Bundesamt für Umwelt BafU.

Pajchrowski, G.; Noskowiak, A.; Lewandowska, A.; Strykowski, W. (2014): Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings. In: Science Direct, Elsevier Ltd.

o. V. (2008): Massivhaus oder Holzhaus – welche Bauweise ist ökologischer. Institut für Massivbau der TU Darmstadt.

Pohl, S. (2016): Nachhaltigkeitsqualität von Mauerwerk im Geschosswohnungsbau. Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau - Fachgebiet Massivbau.

Pohl, S. (2017): Betrachtungen zur Nachhaltigkeitsqualität der Holzbauweise im Wohnungsbau. LCEE Life Cycle Engineering Experts GmbH.

Sandanayake, M.; Lokuge, W.; Zhang, G.; Setunge, S.; Thusha, r Q. (2018): Greenhouse gas emissions during timber and concrete building construction-A scenario based comparative case study. In: Sustainable Cities and Society.

Schäfer, S.; Krause, K., Hafner, A. (2016): Effects of different reference study periods of timber and mineral buildings on material input and global warming potential.

Skullestad, J. L.; Bohne, R. A.; Lohne, J. (2016): High-rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure-A comparative LCA of Structural System Alternatives. In: Energy Procedia, Elsevier Ltd.

Tellnes, L.G.F.; Eide, S.; Kristjansdottir, T.F.; Kron, M. (2013): Assessment of carbon footprint of laminated veneer lumber elements in a six-storey housing – comparison to a steel and concrete solution. In: LCA of Sustainable Materials and Technologies.

Tschümperlin, L.; Frischknecht, R. (2016): Ökobilanz ausgewählter Betonsorten, Schlussbericht, Stadt Zürich, Amt für Hochbauten, Fachstelle Nachhaltiges Bauen.

Woodard, A. C.; Milner, H. R. (2016): Sustainability of timber and wood in construction. In: Sustainability of Construction Materials.

Wolpensinger, H. (2016): Ökobilanz: Punkten mit dem Plusenergiebaustoff Holz. Forum Holzbau.

Unger, T.; Leitschuh, S.; König, H. (2018): Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden, Kurzfassung, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU).

A Anhang

A.1 Literaturrecherchematrix

Jahr	Autor(en) Name, Vorname	Titel, Untertitel
2016	Suter, Florian; Steubing, Bernhard; Hellweg, Stefanie	Life Cycle Impacts and Benefits of wood along the Value Chain: The Case of Switzerland
2018	Heeren, Niko; Hellweg, Stefanie	Tracking Construction Material over Space and Time: Prospective and Geo-referenced Modeling of Building Stocks and Construction Material Flow
2015	Heeren, Niko; Mutel, Christopher L.; Steubing, Bernhard; Ostermeyer, York; Wallbaum, Holger; Hellweg, Stefanie	Environmental impact of buildings: what matters?
2008	Kellenberger, Daniel; Althaus, Hans-Jörg	Relevance of simplifications in LCA of building components
2016	König, Holger	Carbon storage and CO2 substitution in new buildings
2014	Takano, Atsushi; Winter, Stefan; Hughes, Mark; Linkosalmi, Lauri	Comparison of life cycle assessment databases: A case study on building assessment
2016	Martinez-Rocamora, A.; Solis-Guzman, J.; Marrero, M.	LCA databases focused on construction materials: A review
2016	Wolpensinger, Holger	Ökobilanz: Punkten mit dem Plusenergiebaustoff Holz
2011	König, Holger	Bauen mit Holz als aktiver Klimaschutz
2012	Hafner, Annette	Holbauten Nutzung und Lebenszyklus
2012	Dolezal, Franz	Der nachhaltige Holzbau im Vergleich innovativer Gebäudekonzept
2012	Rüter, Sebastian; Diederichs, Stefan	Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz
2010	Loewe, Katrin; Albrecht, Stefan; Wittstock, Bastian; Fischer, Matthias; Sedlbauer, Klaus	Anforderungen an den Ökobilanziellen Vergleich verschiedener Bauweisen am Beispiel 1-2 Familienhaus
2018	Krötsch, Stefan	Holz – Nachhaltiger Baustoff mit Zukunft
2017	Häfliger, Ian-Frederic; John, Viola; Passer, Alexander; Lasvaux, Sebastian; Hoxha, Endrit; Ruschi, Mendes Saade, Marcella; Habert, Guillaume	Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials
2017	Hoxha, Endrit; Habert, Guillaume; Lasvaux, Sébastien; Chevalier, Jacques; Le Roy, Robert	Influence of construction material uncertainties on residential building LCA reliability
2018	Mehr, Jonas; Vadenbo, Carl; Steubing, Bernhard; Hellweg, Stefanie	Environmentally optimal wood use in Switzerland – Investigating the relevance of material

Jahr	Autor(en) Name, Vorname	Titel, Untertitel
		cascades
2015	Diyamandoglu, Vasil; Fortuna, Lorena M.	Deconstruction of wood-framed houses: Material recovery and environmental impact
2014	Sathre, R.	Life cycle assessment (LCA) of wood-based building materials
2014	Tonooka, Yutaka; Takaguchi, Hiroto; Yasui, Koichi; Maeda, Takuo	Life Cycle Assessment of a Domestic Natural Materials Wood House
2011	Guardigli, Luca; Monari, Filippo; Bragadin, Marco Alvise	Assessing Environmental Impact of Green Buildings through LCA Methods: A comparison between Reinforced Concrete and Wood Structures in the European Context
2018	Winder, Gordon M.; Bobar, Amra	Responses to stimulate substitution and cascade use of wood within a wood use system: Experience from Bavaria, Germany
2016	Knauf, Marcus	The wood market balance as a tool for calculating wood use's climate change mitigation effect-An example for Germany
2017	Ramage, Michael H.; Burridge, Henry; Busse-Wicher, Marta; Fereday, George; Reynolds, Thomas; Shah, Darshil U.; Wu, Guanglu; Zu, Li; Fleming, Patrick; Densley-Tngley, Danielle; Allwood, Julian; Dupree, Paul; Linden, P.F.; Scherman, Oren	The wood from the trees: The use of timber in construction
2016	Skullestad, Julie Lyslo; Bohne, Rolf André; Lohne, Jardar	High-rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure – A comparative LCA of Structural System Alternatives
2018	Hossain, Md. Uzzal; Poon, Chi Sun	Comparative LCA of wood waste management strategies generated from building construction activities
2015	Hurmekoski, Elias; Jonsson, Ragnar; Nord, Tomas	Context, drivers, and future potential for wood-frame multistory construction in Europe
2014	Pajchrowski, Grzegorz; Noskowiak, Andrzej; Lewandowska, Anna; Strykowski, Wladyslaw	Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings
2016	Woodard, A.C.; Milner, H.R.	Sustainability of timber and wood in construction
2018	Sandanayake, Malindu; Lokuge, Weena; Zhang, Guomin; Setunge, Sujeeva; Thushar, Quddus	Greenhouse gas emissions during timber and concrete building construction – A scenario based comparative case study
2000	Börjesson, Pal; Gustavsson, Leif	Greenhouse gas balances in building construction: Wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives
2015	Höglmeier, Karin; Steubing, Bernhard; Weber-Blaschke, Gabriele; Richter, Klaus	LCA-based optimization of wood utilization under special consideration of a cascading

Jahr	Autor(en) Name, Vorname	Titel, Untertitel
		use of wood
2013	Tellnes, L.G.F.; Eide, S.; Kristjansdottir, T.F.; Kron, M.	Assessment of carbon footprint of laminated veneer lumber elements in a six-storey housing-comparison to a steel and concrete solution
2015	König, Holger; Kaufmann, Hermann	Aktiver Klimaschutz durch Ressourceneffizienz und Nachwuchspotenzial des Holzbaus am Beispiel von zwei Neubauten und drei Sanierungsprojekten
2011	König, Holger; Kaufmann, Hermann; Lubenau, Christel; Weber-Blaschke, Gabriele; Richter, Klaus; Lattke, Frank	Bauen mit Holz – Wege in die Zukunft
2010	Gustavsson, Leif; Sathre, Roger	Energy and CO2 analysis of wood substitution in construction
2013	Höglmeier, Karin; Weber-Blaschke, Gabriele; Richter, Klaus	Potentials for cascading of recovered wood from building deconstruction – A case study for south-east Germany
2010	Gustaffson, Leif; Joelsson, Anna; Sathre, Roger	Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building
2007	Gerilla, G.P.; Teknomo, K.; Hokao, K.	An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction
2004	Gustavsson, Leif; Sathre, Roger	Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials
2011	Guardigli, Luca; Monari, Filippo; Bragadin, Marco Alvise	Assessing environmental impact of green buildings through LCA methods: A comparison between reinforced concrete and wood structures in the European context
2005	Petersen, Ann Kristin; Solberg, Birger	Environmental and economic impacts of substitution between wood products and alternative materials: A review of micro-level analyses from Norway and Sweden
2017	Ramage et al.	The wood from the trees: The use of timber in construction
2018	Bais-Moleman, Anna-Liza; Sikkema, Richard; Vis, Martijn; Reumermann, Patrick; Theurl, Michaela C., Erb, Karl-Heinz	Assessing wood use efficiency and greenhouse gas emissions of wood product cascading in the European Union
2009	Ortiz, Oscar; Castells, Francesc; Sonnemann, Guido	Sustainability in the construction industry: A review of recent developments based on LCA
2018	Thonemann, Nils; Schumann, Matthias	Environmental impacts of wood-based products under consideration of cascade utilization: A systematic literature review

Jahr	Autor(en) Name, Vorname	Titel, Untertitel
2018	Mehr, Jonas; Vadenbo, Carl; Steubing, Bernhard; Hellweg, Stefanie	Environmentally optimal wood use in Switzerland – Investigating the relevance of material cascades
2007	Borcherding, Malte	Rundholztransportlogistik in Deutschland – Eine transaktionskostenorientierte empirische Analyse
2002	Pohlmann, Kevin Marc	Ökologische Betrachtung für den Hausbau: Ganzheitliche Energie- und Kohlendioxidbilanzen für zwei verschiedene Holzkonstruktionen
2009	Arnold et al.	Klimaschutz und optimierter Ausbau erneuerbarer Energien durch Kaskadennutzung von Biomasseprodukten
2016	Risse, Michael; Richter, Klaus	Nutzung nachwachsender Rohstoffe in Kaskaden – Ansätze zur lebenszyklusorientierten Bewertung der ökologischen und ökonomischen Effekte
2006	Frühwald, Arno; Thoro, Carsten	Nachhaltigkeit und Rohstoffverfügbarkeit – die Holz-Perspektive
2012	Gärtner, Sven O.; Hienz, Gunnar; Keller, Heiko; Paulsch, Detlev	Ökobilanz der kaskadierten Nutzung nachwachsender Rohstoffe am Beispiel Holz – Eine Einordnung
2013	Obkirchner, Christine; Lengwenat, Endrik; Ohnesorge, Denny	Treibhausgasbilanz von Lkw-Rohholztransporten in Deutschland unter Berücksichtigung einer Erhöhung des zulässigen Gesamtgewichts
2012	Rüter, Sebastian; Diederichs, Stefan	Ökobilanz-Basisdaten für Bauprodukte aus Holz
2004	Knauf, Marcus	Trendanalyse Zukunft Holz – Delphistudie zur Entwicklung der deutschen Holzindustrie
2005	Kessel, M.H.; Hoffmeister, H.-W.; Quast, S.; Armbricht, C.	Ökologische Herstellung von Holzhäusern durch Entwicklung und Umsetzung automatisierter und fertigungsoptimierter Produktionsprozesse
-	Woodard, A.C.; Milner, H.R.	Sustainability of timber and wood in construction
2004	Eriksson, Per-Erik	Comparative LCA:s for Wood and Other Construction Methods
2017	Hafner, A.	Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden – Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau)
2017	König, Holger	Projekt: Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden

Jahr	Autor(en) Name, Vorname	Titel, Untertitel
2016	Hafner und Krause	Effects of different reference study periods of timber and mineral buildings on material input and global warming potential
2008	Graubner, C.-A.	Ökobilanzstudie Gegenüberstellung Massivhaus / Holzbauweise
2016	Pohl, S.	Nachhaltigkeitsqualität von Mauerwerk im Geschosswohnungsbau
2017	Pohl, S.	Betrachtungen zur Nachhaltigkeitsqualität der Holzbauweise im Wohnungsbau
2017	Hafner, A. und Rüter, S.	Method for assessing the national implications of environmental impacts from timber buildings – An exemplary study for residential buildings in Germany
2013	Graubner, C.-A.	Nachhaltigkeit von Ein- und Zweifamilienhäusern aus Mauerwerk
2017	Wissenschaftliche Dienste Bundestag	Einzelfragen zur Ökobilanzierung von Gebäuden – Modul D
2008	Albrecht, S. et al.	Ökologische Potenziale durch Holznutzung gezielt fördern
2015	Müller, Daniel; Eichenberger, Michael; Stenz, Michael	Holzbau vs. Massivbau – Ein umfassender Vergleich zweier Bauweisen im Zusammenhang mit dem SNBS Standard

A.2 Analysematrix

Quelle / Grundlagen					
Titel des Artikels	Ökobilanz-Daten für die Erstellung von Fertighäusern	Comparative LCA study of different timber and mineral buildings and calculation method for substitution factors on building level	Relevance of simplifications in LCA of building components	Ökobilanz; Punkten mit dem Plusenergiebaustoff Holz	Bauen mit Holz als aktiver Klimaschutz
Autor(en)	Hermann Achenbach; Sebastian Rüter	Annette Hafner; Sabrina Schäfer	Kellenberger Daniel; Althaus Hans-Jörg	Wolpensinger Holger	König Holger; Kauffmann Hermann; Lattke Frank;
Jahr der Publikation	2016	2017	2008	2016	2011
Herausgeber/ ausführende Stelle	Johann Heinrich von Thünen-Institut	Elsevier Ltd	Elsevier Ltd	Forum Holzbau (forum-holzbau.ch)	Deutsche Bundesstiftung Umwelt
Name des Journals	-	Journal of Cleaner Production	Building and Environment	-	-
Was wird Verglichen / Zielsetzung	Erarbeitung Ökobilanz-Datensätze für durchschnittliche Fertighäuser in Holztafel- und Holzskelettbauweise und deren Bauelemente kein Vergleich zur Massivbauweise	Entwicklung von Substitutionsfaktoren für die Gegenüberstellung der Umweltauswirkungen von Massiv- mit Holzbauweisen.	Vereinfachung der Methodik zur Ökobilanzierung von Gebäuden.	Primärenergiebilanzvergleich zwischen Holzbau und Massivbau	Entwicklung eines neuen Ökobilanz-Kriteriums, das, im Vergleich zu anderen Baustoffen, den Vorteil der räumlichen und zeitlichen Verfügbarkeit von Holz als regional nachwachsenden Rohstoff quantifizieren kann
Angewandte Norm	DIN EN 14040/44 DIN EN 15804	EN 15978:2012 EN 15804:2014 EN 14040:2009 EN 14044:2006	nicht zutreffend	ISO 14 040/44	ISO 14 040/44
Datenbank	Ökobau.dat und WECOBIS Primärdatenerhebung fand in insgesamt 14 Werken der 13 beteiligten ausbaunternehmen statt. Alle erfragten Daten beziehen sich auf die jeweiligen Jahresproduktionen der Unternehmen in 2009	Ökobau.dat 2015	Ecoinvent 1.1	nicht angegeben	Ökobau.dat
Softwaretool	GaBi (Version 6.4.1.20)	LEGEp (Ascona 2016)	LTE-OGIP		
Funktionelle Einheit	1m ³ Bauteilfläche (im wesentlichen)	1m ² GEA (gross external area)	1m ² opakes Bauteil (mit Berücksichtigung des Wärmedurchgangskoeffizienten)	1 m ³ EBF	1 m2 Bruttogrundfläche
Betrachtungszeitraum	50 Jahre	50 Jahre	80 Jahre	50 Jahre	50 Jahre
Vergleichende Gebäude / Gebäudebeschreibung	Primärdatenerhebung zu Fertighäusern in Holzbauweise aus 14 Werken und 13 Hausbauunternehmen Ökobilanzmodell für ein gesamtes Einfamilienhaus und pro m ² Bauteilfläche	EFH mit bis zu 3 Stockwerken MFH mit 3 bis 8 Stockwerken Enthält realisierte Gebäude und generierte Modelle	Es wurden nur einzelne Bauelemente/Komponenten untersucht.	Vergleich eines Gebäudes in Massivholzbauweise (Brettstapel) mit einer Variante mit Ziegelwänden und Stahlbetondecken 4 geschossiges Gebäude KG 300	5 Gebäude mit Holz als primäre Tragkonstruktion: Gewerbebau, Bürogebäude, Verwaltung, Mehrfamiliengebäude Baujahr: 2005-11
Enthaltene Nutzungen	Wohngebäude	Wohngebäude (Ein- Mehrfamilienhäuser)		-	-
Gebäudestandort		Deutschland und Österreich	Schweiz		Österreich
Energiestandard	-	identisch			

Quelle / Grundlagen					
Titel des Artikels	Aktiver Klimaschutz durch Ressourceneffizienz und Wachstumspotenzial des Holzbaus am Beispiel von zwei Neubauten und drei Sanierungsprojekten. Abschlußbericht	Anforderungen an den Ökobilanziellen Vergleich verschiedener Bauweisen am Beispiel 1-2 Familienhaus	Buildings environmental impacts' sensitivity related to LCA modelling choices of construction materials	High-rise Timber Buildings as a Climate Change Mitigation Measure-A comparative LCA of Structural System Alternatives	Wood as a building material in the light of environmental assessment of full life cycle of four buildings
Autor(en)	Dipl. Ing. Architekt Holger König, Prof. Hermann Kaufmann, Dipl.	Loewe Katrin; Albrecht Stefan; Wittstock Bastian; Fischer Matthias; Sedlbauer Klaus	Häflinger Ian-Frederic; John Viola; Passer Alexander; Lasvaux Sebastian; Hoxha Endrit; Ruschi Mendes Saade Marcella; Haxel Guillaume	Skullestad Julie Lysto; Bohne Rolf André; Lohne Jardar	Pajchrowski Grzegorz; Noskowiak Andrzej; Lewandowska Anna; Strykowski Wladyslaw
Jahr der Publikation	2015	2010	2017	2016	2014
Herausgeber/ ausführende Stelle	Deutsche Bundesstiftung Umwelt	BauSim	Elsevier Ltd.	Elsevier Ltd.	Elsevier Ltd.
Name des Journals	-	-	Journal of Cleaner Production	Energy Procedia	Science Direct
Was wird Verglichen / Zielsetzung	Potential von Holzbauweisen im Vergleich zu Massivbauweisen von Gebäuden und Revovierungs-/ Modernisierungsarbeiten	Ökologische Betrachtungen: Einfamilienhaus in konventioneller Mauerwerksbauweise gegenüber EFH in Holzrahmenbauweise (Trockenbau mit hohem Vorfertigungsgrad der Bauelemente)	Untersuchung der Auswirkungen von Modellierungsannahmen zu Baumaterialien in Ökobilanzstudien von Gebäuden auf Gesamtergebnisse	GHG-Einsparungspotential von Holzbaukonstruktionen anstelle von Stahlbetonkonstruktionen bei Mehrgeschossgebäuden	Vergleich von Holz- und Massivbauvarianten für Einfamilienhäuser mit unterschiedlichen Energiestandard
Angewandte Norm	ISO 14 040/44	ISO 14040/ 44 DGNB Anforderungen	EN 15979/15804	NS-EN 15643-2 Diese Europäische Norm ist Teil einer Reihe Europäischer Normen und enthält die spezifischen Grundsätze und Anforderungen an die Bewertung von Gebäuden hinsichtlich ihrer umweltbezogenen Qualität unter Berücksichtigung der technischen Eigenschaften und Funktionalität eines Gebäudes	SimaPro Analyst v.7.3.0/Impact 2002+.
Datenbank	Ökobau.dat	GaBi 4	Ecoinvent v2.2 Swiss Catalogue Construction/KBOB Datensätze Umweltproduktdeklarationen	Ecoinvent 3.2 Umweltproduktdeklarationen Herstellerinformationen	Nicht angegeben
Softwaretool	LEGEP	GaBi 4		SimaPro v7	SimaPro Analyst v.7.3.0/Impact 2002+.
Funktionelle Einheit	1 m² Baukonstruktionsfläche (Nettogrundfläche [NGF] ?)	Bewohnen/Bereitstellen von 1 m² beheizter Wohnfläche für den Betrachtungszeitraum von 50 Jahren	1 m2 Energiebezugsfläche pro Jahr	Gebäude inklusive Fundament mit einer bestimmten Tragkapazität und Anzahl von Stockwerken mit einer Nutzungsdauer von 60 Jahren	Bereitstellung von 98.04 m² Wohnraum für einen Zeitraum von 100 Jahren in dem Bewohner und Einrichtung sicher vor schädlichen externen Faktoren sind
Betrachtungszeitraum	50 Jahre	50 Jahre	60 Jahre	60 Jahre	100 Jahre
Vergleichende Gebäude / Gebäudebeschreibung	8 bestehende Holzgebäude Erstellung und Vergleich anhand digitalen Vergleichsmodell des Originalhaus Nur Gebäude wo Holz primäres Material für Tragkonstruktion ist	2 Einfamilienwohnhäuser	4 Gebäude, Neubau MFH, Baujahr nach 2010	4 Gebäude (1-4) Holzbauweisen sind so dimensioniert, dass sie die gleiche Tragkapazität, fussabdruck und Höhe haben wie die Vergleichsobjekte.	4 hinsichtlich ihrer Funktion identische Gebäude
Enthaltene Nutzungen	Wohnen, Gewerbe, Verwaltung, Öffentliche Einrichtung	Wohnen	-		Wohnen
Gebäudestandort	Deutschland, Österreich	Deutschland Die untersuchten Beispielgebäude wurden auf nebeneinander liegenden Baufeldern errichtet und sind den gleichen klimatischen Beanspruchungen	Schweiz	USA, USA, USA, Trondheim Norwegen	
Energiestandard	Gleicher U-Wert	-	Schweizer Energie Standard: Gebäude 1 -> Minergie (Massivbau) Gebäude 2 -> minergie-Eco (Mix) Gebäude 3 -> Minergie-P (Holzbau) Gebäude 4 -> SIA 380/1 (Massivbau)		

Quelle / Grundlagen					
Titel des Artikels	Sustainability of timber and wood in construction	Greenhouse gas emissions during timber and concrete building construction-A scenario based comparative case study	Massivhaus oder Holzhaus - welche Bauweise ist ökologischer?	Variability in energy and carbon dioxide balances of wood and concrete building materials	"Life cycle primary energy use and carbon emission of an eight-storey wood-framed apartment building"
Autor[en]	Woodard A.C.; Milner H.R.	Sandanayake Malindu; Lokuge Weena; Zhang Guomin; Setunge Sujeeva; Thushar Qudus		Gustavsson Leif; Sathre Roger	Gustafsson Leif; Joelsson Anna; Sathre Roger
Jahr der Publikation	2016	2018	2008	2006	2010
Herausgeber/ ausführende Stelle					
Name des Journals	Sustainability of Construction Materials	Sustainable Cities and Society	-	Building and Environment	Energy and Buildings
Was wird Verglichen / Zielsetzung	Gegenüberstellung Primärenergieverbrauch und THG-Emissionen von Holz- und Massivbauweisen.	Vergleich GHG Emissionen von Holzbaukonstruktionen und Massivbaukonstruktionen	Gegenüberstellung Ökobilanz Massivbauweise mit Holzbauweise eines Wohngebäudes.	Untersuchung und Gegenüberstellung des Einflusses verschiedener Faktoren auf die Ökobilanz von Holz- und Massivbauweise.	Primärenergieverbrauch und THG-Emissionen eines 8 stöckigen Apartmentgebäudes gebaut in Holzrahmenbauweise
Angewandte Norm	keine Angaben	nicht berücksichtigt	ISO 14 040/44	keine Angaben/ nicht berücksichtigt	keine Angaben/ nicht berücksichtigt
Datenbank	Nicht angegeben	Vom Hersteller	Ökobau.dat	Literaturquellen Worrell et al. [17] from the Netherlands, Fossdal [18] from Norway, and Bjo" rklund and Tillman [19] from Sweden.	Literaturquellen 8, 68, 69
Softwaretool		-	Gabi 4	-	ENORM Software zur Berechnung Endenergiebedarf ENSYST für PE bedarf und CO2 produktion während Nutzungsphase
Funktionelle Einheit	unterschiedlich je Studie. Von ganzes Gebäude inklusive fundament und Kellergeschoss bis zu reduziert auf nur sich unterscheidende Bauteile	GHG Emissionen pro m²	nicht spezifiziert	Gebäude als ganzes	m²
Betrachtungszeitraum	-	-	80 Jahre	100 Jahre	50 / 100 Jahre
Vergleichende Gebäude / Gebäudebeschreibung	Review, unterschiedliche	Studie 1: Betonkonstruktion, Gebäude mit 15 Stockwerken in Melbourne, Bürogebäude Studie 2: United Kingdom, Wohn- und Bürogebäude mit jeweils 2 Untergeschossen	fiktives EFH	4 stöckiges Wohngebäude, 16 Wohnungen, 1190 m²	Appartmentgebäude, 33 appartments, 8 stockwerke
Enthaltene Nutzungen		1 Büro, 2 Büro und Wohnen		Nur Wohnen	Nur Wohnen
Gebäudestandort		1 Melbourne 2 United Kingdom		Europäischer Kontext. Referenzwerte aus Schweden, Norwege, Niederlande Studien	Växjö, Schweden
Energiestandard		?	Energiestandard eines KfW 40 Hauses	-	

Quelle / Grundlagen					
Titel des Artikels	An environmental assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction	HOLZBAU VS. MASSIVBAU – EIN UMFASSENDE VERGLEICH ZWEIER BAUWEISEN IM ZUSAMMENHANG MIT DEM SNBS STANDARD	Greenhousegas gas balances in building construction: wood versus concrete from life-cycle and forest land-use perspectives	Assessing Environmental Impact of Green Buildings through LCA Methods: A comparison between Reinforced Concrete and Wood Structures in the European Context	Assessment of carbon footprint of laminated veneer lumber elements in a six story housing – comparison to a steel and concrete solution
Autor(en)	Gerilla G.P.; Teknomo K.; Hokao K.	Müller Daniel; Eichenberger Michael; Stenz Michael	Börjesson, Pal; Gustavsson, Leif	Guardigli Luca; Monari Filippo; Bragadin Marco Alvise	Tellnes L.G.F.; Eide S.; Kristjansdottir T.F.; Kron M.
Jahr der Publikation	2007	2015	2000	2011	2013
Herausgeber/ ausführende Stelle		Bundesamt für Umwelt BAFU			
Name des Journals	Building and Environment	-	Energy Policy	Procedia Engineering	LCA of Sustainable Materials and Technologies
Was wird Verglichen / Zielsetzung	Ökobilanzvergleich eines typischen Wohngebäudes in Saga, Japan, gebaut mit Holz oder Betonbaukonstruktion.	Bewertung und Vergleich der Nachhaltigkeit von Holz- gegenüber Massivbauweise.	Ökobilanzvergleich Holz- vs. Massivbau am Beispiel eines mehrstöckigen Wohngebäudes. CO2, CH4, Primärenergie und Auswirkungen auf Landnutzungsänderungen	Ökobilanzvergleich Holz- gegenüber Massivbauweise.	Vergleich THG-Fußabdruck von Massivbauweise und Holzbauweise
Angewandte Norm	keine Angaben/ nicht berücksichtigt	SNBS Standard	keine Angaben/ nicht berücksichtigt	ISO 14 040/44	EN 15804:2012 EN 15978:2012
Datenbank	Inaba and Sagisaka [10]	SNBS Standard	keine Datenbank erwähnt; Daten aus verschiedenen individuellen Quellen (z.B. Fossdal 1995), Nutzung von Durchschnittswerten	Ecoinvent swiss data base NREL, ELCD, JRC	Umweltproduktdeklaration für verwendetes Brettschichtholz Ecoinvent 2.2 USLCI (2012) & Produkthersteller (für Furnierschichtholz)
Softwaretool	Input-Output table	SNBS Standard	-	openLCA + Ecoindicator 99	SimaPro 7.3.3
Funktionelle Einheit	kg Emission / m ² und Jahr	-	Gebäude als ganzes	Gebäude als ganzes	m ² BTA
Betrachtungszeitraum	35 Jahre		50 / 100 Jahre		nur herstellung
Vergleichende Gebäude / Gebäudebeschreibung	typisches Wohnhaus der Region	Mehrfamilienhaus, 3-geschossig (UG,EG,OG,DG) typenähnlich, gleicher Standort praktisch identische Aussenabmessungen und ähnliche Wohnteilung Holzrahmenbau vs. Konv. Bauweise mit Stahlbeton und Mauerwerk	1 Mehrstöckiges Apartmentgebäude (16 Apartments, 4 Ebenen, ohne Keller/Durchschnittswohnfläche: 65 m ²), Holzbau (real) vs. Massivbau (hypothetisch, wenn gleiches Gebäude auf Massivbauweise erbaut wird)		Gebäude mit 6 Stockwerken, 60 Wohnungen, 5000 m ² BTA, 2 Blöcke mit Anwohnerparken In one facade beam and column system is made of steel and there are diagonal struts of steel in the framework in three corners
Enthaltene Nutzungen	Nur Wohnen	Wohnen	nur wohnen	wohnen	Wohnen
Gebäudestandort	Saga, Japan	Schweiz	Schweden	Italien/Südeuropa	Göteborg, Schweden
Energiestandard	-	Minergie Standard Häuser		Holzgebäude: Nachhaltigkeitszertifiziert energy performances (U-value, thermal inertia) and acoustic performances (phonoinsulating power) of StandardED are the same of Joi.	

Quelle / Grundlagen					
Titel des Artikels	Lebenszyklusanalyse von Wohngebäuden - Lebenszyklusanalyse mit Berechnung der Ökobilanz und Lebenszykluskosten	Treibhausgasbilanzierung von Holzgebäuden - Umsetzung neuer Anforderungen an Ökobilanzen und Ermittlung empirischer Substitutionsfaktoren (THG-Holzbau)	Ökobilanzstudie – Gegenüberstellung Massivhaus / Holzelementbauweise an einem KfW Energiesparhaus 40	Nachhaltigkeitsqualität von Mauerwerk im Geschosswohnungsbau	Nachhaltigkeit von Ein- und Zweifamilienhäusern aus Mauerwerk
Autor(en)	Dipl. Ing. Architekt Holger König, Ascona GbR	Hafner A.; Rüter S.; Ebert S.; Schäfer S.; König H.; Cristofaro L.; Diederichs S.; Kleinhenz M.; Krechel M.	Univ.-Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner, Dipl.-Ing. Achim Knauff	Dr.-Ing. Sebastian Pohl	Graubner, C.-A., Pohl, S.
Jahr der Publikation	2017	2017	2008	2017	2013
Herausgeber/ ausführende Stelle	Auftraggeber: Bayerisches Landesamt für Umwelt und Bayerisches Staatsministerium für Wirtschaft und Medien, Energie		Technische Universität Darmstadt Institut für Massivbau - Fachgebiet Massivbau	Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt	Institut für Massivbau, Technische Universität Darmstadt
Name des Journals	Bericht	-	Forschungsbericht EnV-8-2008		
Was wird Verglichen / Zielsetzung	zweigeschossiges Einfamilienhaus in sechs Bauweisen, drei verschiedene energetische Niveaus und vier verschiedene Heiztechniken = 72 Varianten		Anhand eines als Beispielobjekt gewählten durchschnittlichen Einfamilienhauses wurden stellvertretend für den Massivbau Berechnungen mit den Wandmaterialien Kalksandstein, Leichtbeton, Porenbeton, unbewehrter Beton und Ziegel durchgeführt. Stellvertretend für die Holztafelbauweise wurde eine gängige, in der Literatur	Mehrgeschossiges Mehrfamilienhaus	Ein- und Zweifamilienhäusern
Angewandte Norm	DIN EN 15804 DIN EN 15978 ISO 14044	ISO 14 040/44 EN 15804:2012 EN 15978:2012	DIN EN ISO 14040	DIN EN ISO 14040	DIN EN ISO 14040
Datenbank	ÖKOBAUDAT 6-2016	Ökobau.dat 2015	Ökobaudat des BMVBS, Stand Februar 2008	Ökobau.dat	Ökobau.dat
Softwaretool	LEGEp		GABI 4, bauloop, bauluna		-
Funktionelle Einheit	1 m² Nettonraumbfläche (NRF)		Gesamtes betrachtetes Gebäude (Außenabmessungen ohne Grundstück)	Gesamtes betrachtetes Gebäude (Außenabmessungen ohne Grundstück)	Gesamtes betrachtetes Gebäude (Außenabmessungen ohne Grundstück)
Betrachtungszeitraum	50 Jahre		80 Jahre (nicht normgemäß, Begründung: In Bezug zur Baupraxis entspricht der gewählte Betrachtungszeitraum dem durchschnittlichen Lebensdaueranspruch an ein privates Wohngebäude.)	50 und 80 Jahre	50 und 80 Jahre in Varianten
Vergleichende Gebäude / Gebäudebeschreibung	Wohngebäude		fiktives Einfamilienhaus in Deutschland Es wird das vollständige Gebäude verglichen, die Varianten unterscheiden sich in den Außenwandkonstruktionen und Innenwandkonstruktionen (tragend und nichttragend)	Mehrfamilienhaus	Einfamilienhaus (EFH)
Enthaltene Nutzungen	Wohnen		Wohnen	Wohnen	Wohnen
Gebäudestandort	Deutschland		Deutschland	Deutschland	Deutschland
Energiestandard	3 Varianten: - EnEV 2016 - 30 kWh-Haus - 15 kWh-Haus		KfW Energiesparhaus 40 (Jahres-Primärenergiebedarf QP nicht mehr als 40 kWh pro m² Gebäudenutzfläche AN) Berechnung nach Normbedingungen EnEV	Einhaltung EnEV 2014 mit Verschärfung zum 1.1.2016	Passivhaus-Standard nach Berechnungsregeln der EnEV